VOL. VII, No. 4 JUNE 1956

PLANT AND SOIL

International Journal of Plant Nutrition, Plant Chemistry, Soil Microbiology and Soil-borne Plant Diseases

UNIVERSITY OF HAWAII LIBRARY
AUG 7 '56

MARTINUS NIJHOFF — PUBLISHER — THE HAGUE

PLANT AND SOIL

International Journal of Plant Nutrition, Plant Chemistry, Soil Microbiology and Soil-borne Plant Diseases

Revue internationale de nutrition des plantes, de chimie végétale, de microbiologie du sol et des maladies des plantes en rapport avec le sol

Internationale Zeitschrift für Pflanzenernährung, Pflanzenchemie, Bodenmikrobiologie und bodenbedingte Pflanzenkrankheiten

Issued under the auspices of the "Nederlands Genootschap voor Landbouwwetenschap" (Netherlands Society of Agricultural Science)

Executive Editors: D. I. Arnon, Berkeley; J. Baeyens, Louvain; F. C. Gerretsen, Groningen; E. G. Mulder, Groningen; F. J. Richards, London; A. C. Schuffelen, Wageningen; F. Steenbjerg, Copenhagen.

Consulting Editors: Wm. A. Albrecht, Columbia, Mo.; C. Arnaudi, Milan; E. Gäumann, Zurich; L. Gisiger, Liebefeld-Berne; F. G. Gregory, London, G. W. Harmsen, Groningen; J. den Holder, Ghent; T. H. van den Honert, Leyden; V. J. Koningsberger, Utrecht; J. Lavollay, Paris; W. J. Lütjeharms, Bloemfontein; H. Lundegårdh, Uppsala; E. Melin, Uppsala; M. Mes, Pretoria; M. Ødelien, Ås; E. J. Petersen, Copenhagen; C. S. Piper, Adelaide; J. Smit, Wageningen, H. G. Thornton, Harpenden, Herts.; S. Tovborg Jensen, Copenhagen; A. I. Virtanen, Helsinki; S. A. Waksman, New Brunswick; F. W. Went, Pasadena; Joh^{a}. Westerdijk, Baarn; J. G. Wood, Adelaide.

CONTENTS: TABLE DES MATIÈRES: INHALT:

A. Buchner, Betrachtungen zum Nährstoffverhältnis der Mineraldüngung, dargestellt am Getreide 301

J. H. Williams, The effect of molybdenum on reclaimed Welsh upland pastures 327

E. G. Mulder, Nitrogen-magnesium relationships in crop plants 341

T. C. Broyer, On component and composite flux of matter through natural systems 377

A. Finck, Manganbedarf des Hafers in verschiedenen Wachstumsstadien 389

Printed in the Netherlands

Plant and Soil VII, 301—396 The Hague June 1956

Plant and Soil VII, no 4 June 1956

BETRACHTUNGEN ZUM NÄHRSTOFFVERHÄLTNIS DER MINERALDÜNGUNG, DARGESTELLT AM GETREIDE

von A. BUCHNER

Limburgerhof

Das N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis der Mineraldüngung ist in der deutschen Landwirtschaft in den letzten Jahrzehnten immer enger geworden. In den Jahren 1911–1913 wurde in Deutschland mit einem durchschnittlichen N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis von 1 : 3.5 : 2.7, 1938 mit 1 : 1.2 : 1.8 und 1953/54 mit einem solchen von 1 : 1 : 1.9 gedüngt.

Die Verengung des Nährstoff-Verhältnisses hängt eng mit der steigenden Intensität der Düngung zusammen. Deutlich geht dies z.B. aus einer Aufstellung über den Düngerverbrauch der Kreise des Landes Bayern, der Landwirtschaftskammer Hannover und der Landwirtschaftskammer Nordrhein hervor, die je nach dem N-Verbrauch in bestimmte Gruppen zusammengefasst wurden.

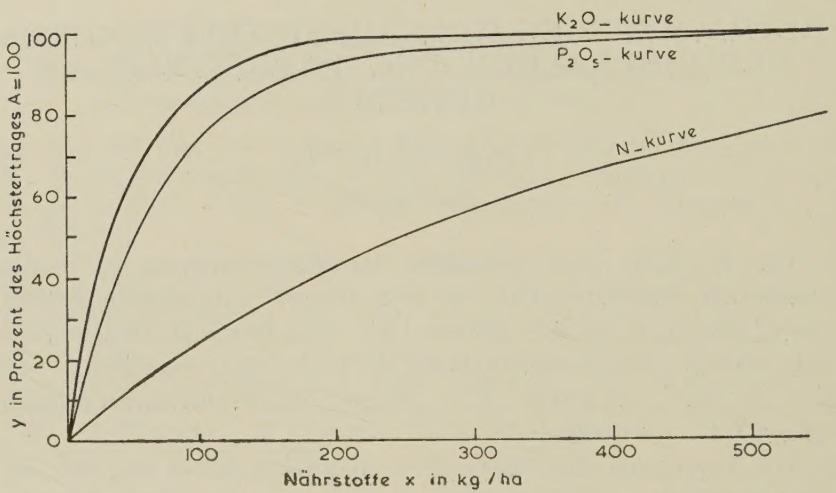
ÜBERSICHT I

Stickstoffverbrauch und N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis in Kreisen mit verschiedenem Intensitätsgrad der Düngung *

Land Bayern 1952/53			Landw. Kammer Hannover 1953/54			Landw. Kammer Nordrhein 1953/54		
Verbrauchsgruppe g N/ha	Zahl der Kreise	Nährstoffverhältnis N : P_2O_5 : K_2O	Verbrauchsgruppe kg N/ha	Zahl der Kreise	Nährstoffverhältnis N : P_2O_5 : K_2O	Verbrauchsgruppe kg N/ha	Zahl der Kreise	Nährstoffverhältnis N : P_2O_5 : K_2O
0– 5	12	1 : 4.7 : 3.7	20–40	14	1 : 1.2 : 2.4	20–40	3	1 : 1.3 : 1.6
5–10	24	1 : 2.2 : 3.3	40–60	9	1 : 0.9 : 1.6	40–60	6	1 : 1.0 : 1.6
10–15	31	1 : 1.7 : 2.4	60–80	13	1 : 0.7 : 1.2	60–80	6	1 : 0.7 : 1.5
15–20	30	1 : 1.3 : 2.0	über 80	4	1 : 0.6 : 1.1	über 80	6	1 : 0.7 : 1.6
20–30	34	1 : 1.1 : 1.7						
ber 30	12	1 : 1.1 : 1.5						

* Berechnet auf grund der amtlichen Düngemittel-Absatzzahlen.

Die Ursache für diese Verschiebung des Nährstoffverhältnisses lässt sich theoretisch aus dem Ertragsgesetz ableiten. Dieses besagt, dass der Nährstoff Stickstoff bei steigenden Gaben einen grundsätzlich anderen Verlauf der Ertragskurven bedingt wie die Nährstoffe P_2O_5 und K_2O. Darstellung 1 gibt darüber einen Überblick.



Darstellung 1. Die N-, P_2O_5- und K_2O-Ertragskurven nach Mitscherlich.

Wie man sieht, weisen die Nährstoffe P_2O_5 und K_2O, wenn man von einem völlig NPK-freien Boden ausgeht, am Anfang der Ertragskurve, also bei geringen Gaben, einen wesentlich steileren Anstieg der Erträge auf als der Nährstoff Stickstoff; sie nähern sich dafür dem Höchstertragsgebiet aber viel eher als jener. Das bedeutet, dass die Erträge durch höhere P_2O_5- oder K_2O-Gaben im Vergleich zu geringen relativ nur noch wenig gesteigert werden können, während sie beim Stickstoff auch bei hohen Gaben infolge des flachen Verlaufes seiner Ertragskurve noch weiter ansteigen.

Auf praktische Verhältnisse übertragen bedeutet dies, dass der Landwirt

1. bei niedriger Düngungsintensität infolge der relativ besseren Leistung der P_2O_5- und K_2O-Gaben geneigt sein wird, mehr Phosphorsäure und Kali anzuwenden, also das Nährstoffverhältnis zu erweitern,
2. bei höherer Düngerintensität mehr die Stickstoffdüngung betont, also das Nährstoffverhältnis verengt.

Auf diese Zusammenhänge hat kürzlich schon Jacob [17] hingewiesen.

Bei der Betrachtung des Nährstoffverhältnisses in der Mineraldüngung und bei der Durchführung von Düngungsversuchen ist diese zwangsläufige Verschiebung des Nährstoffverhältnisses zugunsten von Stickstoff bei zunehmender Düngungsintensität bisher kaum beachtet worden. Im Gegenteil, vielfach wird sogar die Befürchtung ausgesprochen, dass

1. die Verengung des Nährstoffverhältnisses mit wachsender Intensität der Düngung ein grundsätzlicher Düngungsfehler sei und Gefahren für die Ertragsbildung bedinge,
2. eine stärkere Düngung mit einem engen Nährstoffverhältnis (etwa dem der höchsten drei Intensitätsstufen der Übersicht I enstprechend) die vegetativen Pflanzenteile auf Kosten der generativen Teile, d.h. der Körner oder Samen, einseitig fördere.

In den folgenden Ausführungen soll daher anhand von Schrifttumsangaben und experimentellen Untersuchungen der Landw. Versuchsstation Limburgerhof die Frage geprüft werden, ob die bezüglich des N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnisses aus dem Ertragsgesetz zu ziehenden Schlussfolgerungen tatsächlich berechtigt sind.

1. Der einfluss des N : P_2O_5 : K_2O-verhältnisses auf den ertrag

Zur Prüfung der Frage, welche Wirkung eine Verengung des Nährstoffverhältnisses bei höheren Düngergaben auf die Ertragsbildung ausübt, stehen uns 2 Methoden zur Verfügung:

a) Die Suche nach dem sogenannten „Höchstertragsgebiet" bei verschiedenem Nährstoffverhältnis in der Mineraldüngung.

b) Die Berechnung des Korn : Stroh-Verhältnisses bei verschiedenen Intensitätsstufen der Düngung.

a) *Das „Höchstertragsgebiet" unter dem Einfluss des Nährstoffverhältnisses der Mineraldüngung*

Die ersten Versuche über das „Höchstertragsgebiet" bei verschieden hohen Düngergaben sind von Mitscherlich und Mitarbeitern [20] durchgeführt worden. Aus einer grossen Zahl von N : P_2O_5 : K_2O-Kombinationen ergab sich, dass der bei verschiedener Düngungsintensität jeweils erreichbare Höchstertrag keines-

falls mit dem gleichen Nährstoffverhältnis erzielt werden kann. Es findet vielmehr eine Verschiebung des N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnisses statt.

Pflanzenphysiologisch ist besonders jener Punkt beachtenswert, bei welchem mit dem geringsten Aufwand an Nährstoffen das „Höchstertragsgebiet" beginnt. Nach v. Boguslawski [6] handelt es sich bei diesem Punkt in erster Linie um das Nährstoffverhältnis, das als optimal bezeichnet werden kann. Dieses optimale Nährstoffverhältnis wurde z.B. von Mitscherlich [20] je nach der Höhe der N-Düngung bei ganz verschiedenen Punkten erreicht. Näheres darüber geht aus Übersicht II hervor:

ÜBERSICHT II

Intensität der Düngung und optimales Nährstoffverhältnis Das Höchstertragsgebiet wurde erreicht:	
N-Intensität g N je Gefäss	bei einem Nährstoffverhältnis von N : P_2O_5 : K_2O = ca.
0.125	1 : 1.00 : 4
0.25	1 : 1.00 : 3
0.50	1 : 1.00 : 2
0.75	1 : 0.67 : 2
1.00	1 : 0.50 : 1
1.50	1 : 0.50 : 1

Man sieht, dass der relative P_2O_5- und K_2O-Anteil einer Volldüngung, ohne dass der Ertrag beeinträchtigt wird, um so mehr zurücktreten kann, je höher die N-Gabe ist.

Ähnliche Ergebnisse sind den Versuchen von Rippel [26], Rackmann [25] und v. Boguslawski [6] zu entnehmen. Letzterer fand bei zunehmender Intensität der Düngung folgende Verschiebung des optimalen Nährstoffverhältnisses:

ÜBERSICHT III

Intensität der Düngung und optimales Nährstoffverhältnis	
N-Intensität	Optimales Nährstoffverhältnis N : P_2O_5 : K_2O =
gering	1 : 0.96 : 1.33
mittel	1 : 0.73 : 1.20
hoch	1 : 0.75 : 1.15

Diese Gefässversuche ergänzte v. Boguslawski durch Feldversuche [7]. Er stellte dabei fest, dass auf Böden mittlerer bis guter Kali- und Phosphorsäure-Versorgung die Stickstoffwirkung im Vordergrund steht und das Ertragsniveau bestimmt. Erst bei höheren N-Gaben kommt auf diesen Böden die PK-Düngung zur Wirkung. Bei zu schwacher N-Düngung führen P_2O_5- und K_2O-Düngung teilweise sogar zu Ertragsdepressionen.

Freilich können aus solchen Untersuchungen auch andere Schlussfolgerungen herausgelesen werden. So führte z.B. Schmitt [27] Versuche mit steigenden N- und P_2O_5-Gaben an, die folgende Ergebnisse brachten:

ÜBERSICHT IV

Das Wechselspiel zwischen N und P_2O_5.
Hafer, Gesamtertrag in g

Höhe der N-Gabe g je Gefäss	Höhe der P_2O_5-Gabe je Gefäss			
	ohne P_2O_5	0.3 g P_2O_5	0.6 g P_2O_5	0.9 g P_2O_5
0.5	54	82	94	94
1.0	47	103	124	124
1.5	40	108	131	136

Wie man sieht, wurde durch die Unterlassung der P_2O_5-Düngung gegenüber der optimalen P_2O_5-Gabe bei 0.5 g N ein Minderertrag von 40 g, bei 1.0 g N ein solcher von 77 g und bei 1.5 g N einer von 96 g verursacht. Daraus folgerte Schmitt [27], dass es gefährlich sei, wenn das Nährstoffverhältnis bei steigender Düngungsintensität enger wird. Dieser Schluss ist m.E. nicht berechtigt; denn das optimale Nährstoffverhältnis wurde in diesem Versuch bei geringer N-Intensität bei einem N : P_2O_5-Verhältnis von 1 : 1.2, bei mittlerer und hoher N-Intensität aber schon bei 1 : 0.6 erzielt. Somit bestätigt auch dieser Versuch, dass es durchaus richtig ist, mit steigender Düngungsintensität den Phosphorsäureanteil in der Volldüngung relativ zurücktreten zu lassen.

b) *Der Einfluss des Nährstoffverhältnisses in der Düngung auf den Kornproduktionsfaktor*

Die Gestaltung des Stroh : Korn-Verhältnisses bzw. des reziproken Wertes, des Kornproduktionsfaktors, lässt sich aus umfangreichen Gefässversuchen von Mitscherlich [20], Rackmann [25] und Schmitt [28] ermitteln. Er betrug:

ÜBERSICHT V

Der Kornproduktionsfaktor bei verschiedener Intensität der Düngung N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis = 1 : 1 : 1.5–2.0			
Intensität der Düngung	Korn : Stroh (Stroh = 1)		
	Mitscherlich [20]	Rackmann [25]	Schmitt [25]
sehr gering	0.63	0.50	—
gering	0.77	0.50	0.65
mittel	0.77	0.62	0.68
hoch	0.83	0.57	0.72

Den Ergebnissen dieser Gefässversuche kann die oft übersehene Tatsache entnommen werden, dass steigende NPK-Gaben bei gleichbleibendem N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis den Kornproduktionsfaktor laufend verbessern. Der Anstieg ist nicht unbeträchtlich. Er beträgt bei der intensiven Düngung im Vergleich zur extensiven im Durchschnitt rd. 22%. Zu ähnlichen Verbesserungen des Kornproduktionsfaktors kam jüngst auch v. Boguslawski [67].

Welchen Einfluss üben nun die einzelnen Nährstoffe auf den Kornproduktionsfaktor aus? Lassen wir hierzu wieder Mitscherlich sprechen. Er kommt auf grund von Tausenden von Gefässversuchen zu folgendem Schluss [20]: „Wenn wir die verschiedenen Stickstoffgruppen betrachten, so erkennen wir deutlich, dass das Korn : Stroh-Verhältnis enger" (d.h. der Kornproduktionsfaktor günstiger) „wird, wenn wir grössere Stickstoffmengen geben. Es dürfte danach nicht richtig sein, wenn man sagt, dass Stickstoff speziel den Strohertrag fördert. Das Korn : Stroh-Verhältnis wird dagegen durch Kali meist nicht verändert.... Auch die Phosphorsäure scheint keinen erheblichen Einfluss auf das Korn : Stroh-Verhältnis auszuüben".

Diese Angaben von Mitscherlich widersprechen scheinbar der allgemeinen Schulmeinung, die meist den Nährstoffen Phosphorsäure und Kali eine gewisse Priorität in der Wirkung auf die Körnerbildung zuschreibt. Dieser Widerspruch ist aber nur ein scheinbarer. Er ist darauf zurückzuführen, dass meistens die Ergebnisse von extremen P_2O_5- und K_2O-Mangelböden uneingeschränkt auf normale Bodenverhältnisse übertragen worden sind. Um in der Frage des Korn : Stroh-Verhältnisses zu klaren Ergebnissen zu kommen, darf diese Verallgemeinerung nicht vorgenommen werden. Es muss selbstverständlich zwischen normal und gering mit P_2O_5

und K_2O versorgten Böden unterschieden werden. Als Beweis führen wir in den Übersichten VI und VII einige neuere Ergebnisse an, die nach der Höhe der durch Kali-Phosphatdüngung erzielten Ertragssteigerungen geordnet sind:

ÜBERSICHT VI

Die Wirkung der P_2O_5-Düngung auf den Kornproduktionsfaktor (Stroh = 1, Korn = ?)

Autor	Ertragssteigerung durch normale P_2O_5-Düng. in % gegenüber ohne P_2O_5	N : P_2O_5-Verh. d. norm. NPK-Düngung	Kornproduktionsfaktor				
			ohne P_2O_5	normale NPK-Düngung	normale NPK-Düngung + P_2O_5-Zulage	erhöhte NPK-Düngung	erhöhte NPK-Düngung + P_2O_5-Zulage
Schmitt[28]	15	1 : 1.0	0.62	0.57	0.53	0.69	0.66
Nehring[21]	18	1 : 1.0	0.78	0.69	0.68	0.68	0.69
Schmitt[29]	53	1 : 1.5	0.69	0.73	0.74	0.78	0.78
Keese[18]	85	1 : 1.0	1.00	0.85	0.86	0.88	0.89
Schropp[39]	110	1 : 1.0	0.72	0.76	0.77	0.81	0.81

ÜBERSICHT VII

Die Wirkung der K_2O-Düngung auf den Kornproduktionsfaktor (Stroh = 1, Korn = ?)

Autor	Ertragssteigerung durch normale K_2O-Düng. in % gegenüber ohne K_2O	N : K_2O-Verh. d. norm. NPK-Düngung	Kornproduktionsfaktor				
			ohne K_2O	normale NPK-Düngung	normale NPK-Düngung + K_2O-Zulage	erhöhte NPK-Düngung	erhöhte NPK-Düngung + K_2O-Zulage
Opitz[23]	ca. 5	1 : 1.0	0.97	0.89	0.88	—	—
Schmitt[28]	ca. 60	1 : 1.75	0.72	0.69	0.71	0.76	0.76
Opitz[23]	100% u. mehr	1 : 1.0	0.88	0.96	0.90	—	—
Blank[5]	ca. 100	1 : 1.0	0.53	0.63	0.63	0.63	0.65
Blank[5]	ca. 400	1 : 1.5	0.35	0.69	0.65	0.69	0.64

Aus den Ergebnissen ist deutlich die Tendenz zu erkennen, dass sich die Phosphat- und Kalidüngung bzw. eine Kaliphosphat-Zulage auf den Kornproduktionsfaktor nur bei extremen P_2O_5- und K_2O-Mangel günstig auswirkt. Werden dagegen durch Kali und Phosphorsäure nur Ertragssteigerungen bis zu 20%, d.h. Ertragssteigerungen erreicht, wie sie in der Praxis normal sind, so hat eine P_2O_5- und K_2O-Düngung keine verbessernde Wirkung auf den Korn-

produktionsfaktor. Bei erhöhter NPK-Düngung hatte eine PK-Zulage in keinem einzigen Fall, also auch nicht bei extremem PK-Mangel, eine sichere Verbesserung des Kornproduktionsfaktors zur Folge.

Diese Befunde bedeuten, dass der optimale Kornproduktionsfaktor bereits durch verhältnismässig niedrige P_2O_5- und K_2O-Gaben erreicht wird. Als Beispiel hierfür führen wir in Übersicht VIII noch das Ergebnis eines Versuches auf Quarzsand in Mitscherlich-Gefässen zu Hafer von Pfaff und Roth[24] an.

ÜBERSICHT VIII

Der Einfluss des N : P_2O_5- bzw. N : K_2O-Verhältnisses auf den Kornproduktionsfaktor von Hafer *
Trockensubstanzerträge je Gefäss, g

N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis	Körner	Stroh	Kornproduktionsfaktor	N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis	Körner	Stroh	Kornproduktionsfaktor
1 : **0.00** : 2.1	18.4	33.3	**0.55**	1 : 1.2 : **0.00**	3.9	15.2	**0.26**
1 : **0.16** : 2.1	34.4	53.3	**0.64**	1 : 1.2 : **0.25**	18.4	31.6	**0.58**
1 : **0.42** : 2.1	35.7	58.7	**0.60**	1 : 1.2 : **0.58**	21.6	39.0	**0.56**
1 : **0.67** : 2.1	32.4	57.9	**0.56**	1 : 1.2 : **1.10**	27,8	47.1	**0.59**
1 : **1.00** : 2.1	31.3	54.7	**0.58**	1 : 1.2 : **2.60**	28.3	50.9	**0.56**
1 : **1.40** : 2.1	31.2	54.3	**0.57**				

* Bodenart: Quarzsand und 10% Boden von Limburgerhof; Höhe der N-Gabe: 1.2 g je Gefäss.

Wie man erkennt, wirkt die PK-Düngung durchaus günstig auf das Korn : Stroh-Verhältnis ein. Die optimale Wirkung ist aber in diesen Versuchen bereits bei einem N : P_2O_5-Verhältnis von 1 : 0.42 bzw. bei einem N : K_2O-Verhältnis von 1 : 1.1 erreicht worden. Auch Blank[5] fand den optimalen Kornproduktionsfaktor zu Hafer bei einem N : K_2O-Verhältnis von 1 : 1.2, zu Gerste bei einem solchen von 1 : 1.5; nach Opitz[23] liegt er bei 1.0; nach Mitscherlich[20] bei 1 : 0.6–1.1 und nach Gebhardt[12] bei rd. 1 : 1. Das optimale N : P_2O_5-Verhältnis beträgt nach Opitz[23] 1 : 0.5, nach Mitscherlich[20] bei mittleren N-Gaben 1 : 0.5–0.6, nach Gericke[13] ca. 1 : 0.5. Solche Beispiele liessen sich fast beliebig lang fortsetzen.

Nach diesen Befunden nimmt es kein Wunder, dass man in Feldversuchen nur selten eine gesicherte Veränderung des Kornproduktionsfaktors durch Kali- und Phosphatdüngung nachweisen kann.

Das geht auch aus Versuchsberichten über Tausende von Feldversuchen hervor, die von Gericke[14] sowie von Asdonk und Jacob[1] zusammengestellt wurden. Aus ihnen lassen sich folgende Kornproduktionsfaktoren errechnen:

ÜBERSICHT IX

Die Wirkung steigender P_2O_5-Gaben auf den Kornproduktionsfaktor (nach Gericke[14] berechnet)

Frucht	Anzahl der Versuche	Höhe der P_2O_5-Gabe in kg/ha				
		0	30	60	90	120
W. Roggen	1200	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
Hafer	960	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
W. Weizen	500	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
S. Gerste	363	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
Durchschnittlicher Kornertrag, dz/ha		23.25	25.62	26.50	28.12	28.62

ÜBERSICHT X

Die Wirkung steigender K_2O-Gaben auf den Kornproduktionsfaktor (nach Asdonk[1] berechnet)

Frucht	Anzahl der Versuche	Höhe der K_2O-Gabe in kg/ha			
		0	40	80	120
W. Roggen	712	0.47	0.41	0.46	0.47
W. Weizen	504	0.53	0.55	0.53	0.54
W. Gerste.	91	0.67	0.67	0.70	0.69
S. Gerste	332	0.63	0.62	0.63	0.64
Hafer	454	0.62	0.62	0.61	0.62
Durchschnittlicher Kornertrag, dz/ha		24.50	26.24	26.70	27.56

Die Ergebnisse dieser Feldversuche weisen klar darauf hin, dass die bei sehr nährstoffarmen Böden feststellbaren günstigen Effekte von Kali- und Phosphatgaben auf den Kornproduktionsfaktor auf normale Anbauverhältnisse, wie sie den grossen Versuchsreihen zugrunde liegen, nicht übertragen werden dürfen. Die angeführten Versuche zeigen ausserdem, dass der optimale Kornproduktionsfaktor bei engerem N : P_2O_5- bzw. N : K_2O-Verhältnis erreicht wird als der optimale Kornertrag. Bei der Bemessung der Kaliphosphatdüngung braucht daher kaum auf ihren Einfluss auf das Korn : Stroh-Verhältnis, sondern nur auf den optimalen Kornertrag Rücksicht genommen zu werden.

Die gute Übereinstimmung, die zwischen Gefäss- und Feldversuchen hinsichtlich des Einflusses steigender P_2O_5- und K_2O-Gaben auf den Kornproduktionsfaktor bestehen, findet sich beim Nährstoff Stickstoff nicht immer. In Gefässversuchen lässt sich— als Beispiel hierfür sei nochmals an die Gefässversuche von Mitscherlich[20] und v. Boguslawski[6] erinnert — bei steigenden N-Gaben in der Regel ein steigender Kornproduktionsfaktor finden. In Feldversuchen verhalten sich steigende N-Gaben aber nicht immer in gleicher Weise. Die Ursache hierfür liegt darin, dass Lagerschäden in Gefässversuchen im Gegensatz zu Feldversuchen weitgehend verhütet werden können. In Gefässversuchen kann der Stickstoff daher seine physiologisch günstige Wirkung auf die Körnerbildung ungestört auswirken. In der Praxis ist dagegen dieser günstigen Wirkung des Stickstoffs aus bekannten Gründen eine Grenze gesetzt.

Somit ist es nicht verwunderlich, dass die Stickstoffdüngung den Kornproduktionsfaktor je nach Umweltverhältnissen sehr verschieden beeinflusst. Schon bei den einzelnen Getreidearten ist dieser unterschiedliche Einfluss festzustellen. Wie aus den Versuchen von Biederbeck[4], Ströbele[31] und den Versuchen der Landw. Abteilung der BASF[2 3] zu erkennen ist, beeinflusst die Stickstoffdüngung den Stroh- und Kornanteil bei W.-Roggen, W.-Weizen und Hafer ziemlich gleichmässig. Lediglich bei der Sommergerste ist durch die höchste N-Gabe der Strohanteil etwas stärker gefördert worden als der Kornanteil, wie aus Übersicht XI zu entnehmen ist.

ÜBERSICHT XI

Die Wirkung steigender N-Gaben auf den Kornproduktionsfaktor

Frucht	ohne Stickstoff	mit 40 kg N/ha	mit 60 kg N/ha
W.-Roggen	0.46	0.47	0.47
W.-Weizen	0.51	0.51	0.50
S.-Gerste	0.72	0.73	0.68
Hafer	0.60	0.60	0.60

Einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der N-Düngung gegenüber dem Kornproduktionsfaktor übt die Sorte aus. Als Beispiel hierfür führen wir Versuchsergebnisse von Hofmann und Amberger[15] an. Bei diesen Versuchen konnte eine sehr standfeste Weizensorte im dreijährigen Durchschnitt den Kornproduktionsfaktor bei steigenden N-Gaben bis zu 80 kg/ha praktisch auf derselben Höhe (nämlich 0.51–0.50) halten, während dieser bei einer

weniger standfesten Sorte von dem Wert 0.49 bei ohne Stickstoff auf den Wert 0.41 bei 80 kg N ha absank. Ein ähnliches Beispiel findet sich dort zu Sommergerste.

Ein weiterer Faktor ist die Saatzeit und Saatstärke. Aus Gerstenversuchen von Ehrenberg und Buchner[11] lässt sich z.B. bei sehr früher Saatzeit ein Kornproduktionsfaktor von 0.67 errechnen, bei rd. 20 Tage späterer Saat ein solcher von 0.56. Bei den verschiedenen Saatstärken (120 bzw. 160 kg/ha) ergeben sich Werte von 0.60 bis 0.69. Durch die Stickstoffdüngung wurde dieser Faktor gegenüber PK zur negativen Seite hin dagegen nur um 0.03 Einheiten (von 0.66 bis 0.63) verschoben. Ähnliche Befunde ergaben sich auch bei anderen Versuchen[8]. Nicht zu vergessen ist auch der Witterungseinfluss. Anschaulich lässt sich dieser z.B. aus dem Vergleich der Jahre 1953 und 1954, also einem im Grundcharakter trockenen und einem im Grundcharakter nassen Jahr erkennen. Während im Jahre 1953 von 100 von uns in Zusammenarbeit mit Landwirtschaftsämtern und Wirtschafsberatungsstellen durchgeführten Versuchen zu Getreide in 65 Fällen der Kornproduktionsfaktor durch Stickstoffdüngung praktisch unbeeinflusst geblieben oder sogar verbessert worden ist, waren es im Jahre 1954 nur 47 Fälle.

Alle diese Beispiele zeigen, dass das Korn : Stroh-Verhältnis von den verschiedensten Faktoren abhängig ist, unter denen die Düngung einer von vielen ist. Innerhalb der Volldüngung übt der Nährstoff Stickstoff den stärksten Einfluss aus. Der Einfluss der Stickstoffdüngung ist aber keineswegs in jedem Falle ungünstig, sondern kann je nach den Umweltverhältnissen positiv oder negativ sein. Die Kaliphosphatdüngung wirkt sich dagegen unter normalen Verhältnissen, d.h. bei Betrieben, die Jahr für Jahr regelmässig Kali und Phosphat streuen, praktisch nicht auf den Kornproduktionsfaktor aus. Diese Nährstoffe verändern den Kornproduktionsfaktor nur dann, wenn extrem kali- oder phosphatarme Böden vorliegen.

2. Das Nährstoffverhältnis der N-, P_2O_5- und K_2O-Entzüge bei steigenden Düngergaben

Für die Beurteilung des optimalen Nährstoffverhältnisses ist es

wichtig, dass die Nährstoffe N, P_2O_5 und K_2O bei hohen Düngergaben in einem anderen Verhältnis aufgenommen werden als bei geringen Düngergaben, auch wenn das Nährstoffverhältnis in der Düngung stets dasselbe bleibt. Wie aus den Untersuchungen von Rackmann [25] zu entnehmen ist, wird bei hohen Düngergaben der Nährstoff der sich im Minimum befindet, im Verhältnis zu den anderen stärker aufgenommen als bei geringen Gaben.

In diesem Zusammenhang ist daran zu erinnern, dass sich in unseren Mineralböden der Stickstoff am meisten im Minimum befindet. Hieraus folgt, dass in der Praxis bei hohen Düngergaben die Pflanze in der Regel im Verhältnis zu Stickstoff weniger Kali und Phosphorsäure verbraucht als bei geringen Düngergaben. Diese Tatsache konnte kürzlich v. Boguslawski [6 7] durch sehr eingehende Untersuchungen erneut unter Beweis stellen. Um ein weiteres Beispiel zu geben, seien neuere Versuche angeführt, die auf der Versuchsstation Limburgerhof mit 2 verschiedenen Bodenarten zu Hafer mit steigenden N-, P_2O_5- und K_2O-Gaben im Nährstoffverhältnis 1 : 1 : 1.75 in Mitscherlichgefässen durchgeführt worden sind [24]. Diese Versuche brachten folgende, in Übersicht XII dargestellte Ergebnisse:

ÜBERSICHT XII

Der Entzug an N, P_2O_5 und K_2O bei steigenden NPK-Gaben, aber gleichbleibendem Verhältnis bei Hafer
N : P_2O_5 : K_2-O-Verhältnis der Düngung = 1 : 1 : 1.75

Höhe der Nährstoffgabe g N je Gefäss	Boden vom Limburgerhof I				Boden vom Limubrgerhof II			
	Gesamtentzug (mg) an			N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis des Nährstoffentzuges	Gesamtentzug (mg) an			N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis des Nährstoffentzuges
	N	P_2O_5	K_2O		N	P_2O_5	K_2O	
0	114	191	622	1 : 1.7 : 5.4	20	20	73	1 : 1.0 : 3.7
0.2	305	421	1235	1 : 1.4 : 4.0	98	109	336	1 : 1.1 : 3.4
0.5	487	552	1788	1 : 1.1 : 3.8	374	348	809	1 : 0.9 : 2.2
0.8	726	761	2264	1 : 1.1 : 3.1	585	492	1112	1 : 0.8 : 1.9
1.7	1637	1368	2863	1 : 0.8 : 1.8	882	706	1644	1 : 0.8 : 1.8

Die bevorzugte Aufnahme des Nährstoffes Stickstoff bei höheren Düngergaben kommt hauptsächlich – wie v. Boguslawski ebenfalls kürzlich zeigen konnte – durch seine verstärkte Aufnahme im Korn zustande. Auch in Versuchen von Rackmann [25] lässt sich diese Tatsache finden. Einen jüngeren Versuch der Versuchsstation Limburgerhof gibt Übersicht XIII wieder.

ÜBERSICHT XIII

Der Gehalt an N, P_2O_5 und K_2O im Korn und Stroh bei steigenden NPK-Gaben und gleichbleibendem Nährstoffverhältnis zu Sommerweizen
N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis der Düngung = 1 : 1 : 1.75

Höhe der NPK-Gabe * bezogen auf g N je Gefäss	Körner				Stroh			
	%-Gehalt der Tr.S.			N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis d. Nährstoffgehalte	%-Gehalt der Tr. S.			N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis d. Nährstoffgehalte
	N	P_2O_5	K_2O		N	P_2O_5	K_2O	
0.015	1.34	1.03	0.73	1 : 0.77 : 0.54	0.33	0.122	1.06	1 : 0.37 : 3.20
0.030	1.34	0.99	0.73	1 : 0.74 : 0.54	0.33	0.116	1.12	1 : 0.35 : 3.39
0.060	1.29	0.96	0.72	1 : 0.74 : 0.56	0.33	0.126	1.24	1 : 0.38 : 3.76
0.12	1.25	0.81	0.72	1 : 0.65 : 0.57	0.31	0.133	1.43	1 : 0.43 : 4.60
0.20	1.29	0.90	0.75	1 : 0.70 : 0.58	0.28	0.149	1.62	1 : 0.53 : 5.78
0.50	1.42	0.96	0.76	1 : 0.67 : 0.54	0.31	0.207	1.72	1 : 0.67 : 5.55
1.30	1.86	0.99	0.76	1 : 0.53 : 0.41	0.44	0.373	2.16	1 : 0.84 : 4.90
2.40	2.75	1.16	0.80	1 : 0.42 : 0.29	0.89	0.642	3.49	1 : 0.72 : 3.92

* Die NPK-Salze wurden in Form von Ammonnitrat, Dikalziumphosphat und Kaliumsulfat gegeben und beim Ansetzen der Gefässe mit dem Boden (Quarzsand) vermischt.

Die vorstehenden Zahlen zeigen, dass der P_2O_5-Anteil und der K_2O-Anteil im Korn im Vergleich zum Stickstoff mit zunehmender Düngungsintensität stetig zurückgeht. Bei der P_2O_5- und K_2O-Einlagerung ins Korn scheinen also bei hohen Nährstoffgaben Schwierigkeiten aufzutreten. Im Stroh liegen die Verhältnisse bis zu einem gewissen Punkt dagegen gerade umgekehrt. Das Stroh nimmt Kali bei steigenden Gaben bereitwillig auf, sogar viel stärker als Stickstoff. Auch der P_2O_5-Anteil nimmt mit zunehmender NPK-Düngung relativ stärker zu als der an Stickstoff.

Das Engerwerden des Nährstoffverhältnisses beim Korn und demgegenüber die Erweiterung im Stroh bei steigenden Nährstoffgaben scheint hauptsächlich dann beobachtet zu werden, wenn in Versuchen von praktisch nährstofffreien Böden (Quarzsand) ausgegangen wird, so wie es in den Versuchen von Rackmann[25], v. Boguslawski[6] und den in Übersicht XIII erwähnten Versuchen geschehen ist. Werden zu den Versuchen dagegen Böden benutzt, die von Natur aus bereits gewisse Nährstoffvorräte an P_2O_5 und K_2O mitbringen und bei denen sich der Stickstoff im Minimum befindet, so verläuft die Verschiebung des Nährstoffverhältnisses bei steigenden NPK-Gaben im Korn und Stroh in gleicher Richtung. Als Beweis dafür seien in Übersicht XIV nochmals – jetzt aber aufgeteilt in Korn und Stroh – die bereits in Übersicht XII erläuterten

Versuche von Pfaff und Roth[24] angeführt, die im Verhältnis zu N auf PK-reicheren Bodenarten durchgeführt wurden. Wie den Zahlen zu entnehmen ist, ist unter solchen Verhältnissen eine relativ stärker geförderte Stickstoffaufnahme nicht nur im Korn, sondern auch im Stroh deutlich zu erkennen.

ÜBERSICHT XIV

Der Gehalt an N, P_2O_5 und K_2O im Korn und Stroh bei steigenden NPK-Gaben und gleichbleibendem Nährstoffverhältnis zu Hafer auf N-Mangelböden
N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis der Düngung = 1 : 1 : 1.75

Höhe der NPK-Gabe bezogen auf g N je Gefäss	Körner				Stroh			
	%-Gehalt der Tr. S.			N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis d. Nährstoffgehalte	%-Gehalt der Tr. S.			N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis d. Nährstoffgehalte
	N	P_2O_5	K_2O		N	P_2O_5	K_2O	
Boden vom Limburgerhof I *								
0.2	1.19	0.83	0.68	1 : 0.70 : 0.57	0.36	1.19	4.40	1 : 3.31 : 12.20
0.5	1.24	0.77	0.69	1 : 0.62 : 0.56	0.26	0.73	3.60	1 : 2.81 : 13.85
0.8	1.27	0.78	0.68	1 : 0.61 : 0.54	0.37	0.80	3.61	1 : 2.16 : 9.76
1.7	1.59	0.88	0.68	1 : 0.55 : 0.43	0.87	1.10	3.27	1 : 2.26 : 3.76
Boden vom Limburgerhof II								
0.2	1.17	0.77	0.74	1 : 0.66 : 0.63	0.34	0.55	2.23	1 : 1.62 : 6.56
0.5	1.14	0.73	0.79	1 : 0.64 : 0.69	0.35	0.55	1.89	1 : 1.57 : 5.40
0.8	1.31	0.82	0.92	1 : 0.63 : 0.70	0.48	0.59	1.95	1 : 1.23 : 4.06
1.7	2.04	1.09	1.00	1 : 0.53 : 0.49	1.06	1.24	3.30	1 : 1.17 : 3.11

* Nährstoffgehalt nach Neubauer: ca. 8 mg P_2O_5 und ca. 16 mg K_2O je 100 g Boden.

Die Tatsache, dass sich das Nährstoffverhältnis in Korn und Stroh bei steigenden NPK-Gaben in verschiedener Richtung verändern kann, ist u.E. nichts weiter als ein Ausdruck der unterschiedlichen Einlagerungskapazität von Korn und Stroh für PK einerseits und Stickstoff andererseits. Dazu muss man sich nur vorstellen, dass die Pflanzen, um ihre Art zu erhalten, bei unzureichender Ernährung alle verfügbaren, lebensnotwendigen Nährstoffe ihren generativen Organen zuführen. Geht man bei NPK-Steigerungsversuchen von einem praktisch NPK-freien Boden aus, so darf man daher ohne weiteres annehmen, dass bei geringeren NPK-Gaben zuerst soviel Nährstoffe wie möglich im Korn eingelagert werden. Da die Aufnahmefähigkeit des Kornes für P_2O_5 und K_2O viel früher erreicht ist als für Stickstoff, findet bei geringen NPK-Gaben im Korn eine relative Anreicherung, im Stroh dagegen eine relative Verarmung an Stickstoff statt. Zudem muss durch die begrenzte Einlagerungsmöglichkeit des Kornes für P_2O_5 und K_2O ein Anstau und daher eine

Anreicherung dieser Nährstoffe im Stroh erfolgen. Die Folge davon ist, dass das Nährstoffverhältnis im Stroh bei steigenden NPK-Gaben auf nährstoffarmen Böden zunächst weiter wird.

Die Aufnahmefähigkeit des Kornes für Stickstoff und die des Strohes für P_2O_5 und K_2O ist aber nicht unbegrenzt. Höhere NPK-Staffeln müssen sich daher einmal einem Punkt nähern, an dem

1. auch Stickstoff nur noch in geringerem Umfang ins Korn eingelagert und hauptsächlich im Stroh aufgespeichert wird,

2. die Aufnahmekapazität für P_2O_5 und K_2O innerhalb der ganzen Pflanze weitgehend erschöpft ist.

Bis zu höchsten Gaben durchgeführte NPK-Steigerungen führen daher nicht nur im Korn, sondern auch im Stroh zu einer Verengung des Nährstoffverhältnisses, und zwar um so eher, je besser der Boden mit PK versorgt und je mehr der Stickstoff im Minimum ist. Auf PK-armen Böden scheint dieser Prozess der Nährstoffverhältnis-Verschiebung dagegen langsamer vor sich zu gehen, wie auch aus entsprechenden Versuchen von Schmitt[28] errechnet werden kann.

Die Tatsache, dass bei steigenden NPK-Gaben im Stroh eine relativ starke Anreicherung von P_2O_5 und K_2O, im Korn dagegen eine relativ stärkere Anhäufung von Stickstoff vorkommen kann, wirft Probleme auf, die bisher nur wenig beachtet wurden. Um sie klar herauszustellen, seien nochmals typische Ergebnisse von Nährstoff-Steigerungsversuchen erwähnt, bei denen auch der Nährstoffgehalt der Pflanzen ermittelt wurde. Den Angaben von Rackmann[25] ist z.B. zu entnehmen, dass der P_2O_5-Gehalt des Kornes bei Steigerung von 0.5 g P_2O_5 auf 2.0 g P_2O_5 je Gefäss um ca. 20–30%, im Stroh dagegen um 1100–1500% zunimmt. Beim Kali ist die Diskrepanz zwischen dem Verlauf des K_2O-Gehaltes und jenem im Stroh noch ausgeprägter. Im Korn nahm dort der Kaligehalt durch Erhöhung der K_2O-Düngung von 0.5 g K_2O je Gefäss auf 3.0 g praktisch überhaupt nicht mehr zu, während er im Stroh auf rd. 800% anstieg. Ähnliche Ergebnisse fanden Blank and Heukeshoven[5]. Ein weiteres typisches Beispiel geben wir in Übersicht XV wieder.

Wie all diese Befunde zeigen, werden P_2O_5- und K_2O-Mengen, die im Überfluss verabreicht werden, ohne Einfluss auf die Höhe des Ertrages *gespeichert*, und zwar hauptsächlich im Stroh. Es tritt ein sogenannter Luxusverbrauch an Kali und Phosphorsäure ein.

ÜBERSICHT XV

Der Einfluss steigender P_2O_5- und K_2O-Gaben auf den P_2O_5- und K_2O-Gehalt des Hafers*

Höhe der P_2O_5-Gabe g je Gefäss	Gesamtertrag in g je Gefäss	% P_2O_5		Höhe der K_2O-Gabe g je Gefäss	Gesamtertrag in g je Gefäss	% K_2O	
		Korn	Stroh			Korn	Stroh
0.5	83.9	0.70	0.24	0.3	50.0	0.83	0.28
0.8	90.3	0.91	0.49	0.7	60.6	0.87	1.30
1.2	86.0	0.98	0.78	1.3	74.9	0.87	1.60
2.4	82.9	1.07	1.16	4.2	77.8	1.01	4.19

* Bodenart: Quarzsand + 5% Boden vom Limburgerhof.
Höhe der N-Gabe: 1.2 g N als NH_4NO_3.
Höhe der P_2O_5-Gabe bei der K_2O-Steigerung: 1.2 g P_2O_5.
Höhe der K_2O-Gabe bei der P_2O_5-Steigerung: 2.1 g K_2O.

Um die Ursachen für die Schwierigkeiten, die sich bei der Einlagerung von P_2O_5 und K_2O ins Korn bei höheren PK-Gaben ergeben, näher zu beleuchten, sei auf Versuche hingewiesen, die wir bei gleicher PK-Düngung mit steigenden N-Gaben zu Hafer durchgeführt haben. Sie sind in den Übersichten XVI und XVII angeführt.

ÜBERSICHT XVI

Der Zusammenhang zwischen N- und P_2O_5-Gehalt im Getreide

Höhe der N-Gabe g	1.2 g P_2O_5 + 2.1 g K_2O			2.4 g P_2O_5 + 4.2 g K_2O		
	Körner		Stroh	Körner		Stroh
	% N	% P_2O_5	% P_2O_5	% N	% P_2O_5	% P_2O_5
0	1.31	0.93	1.11↑	1.52	0.96	1.21↑
0.2	1.10	0.77	0.81	1.21	0.85	0.88
0.5	1.19	0.80	0.75	1.16	0.77	0.74
0.8	1.36	0.82	0.78	1.25	0.75	0.70
1.2	1.53	0.86	0.76	1.43	0.81	0.74
1.7	1.78	0.94	0.70	1.73	0.91	0.66
2.4	2.16↓	1.04↓	0.58	2.12↓	1.02↓	0.65

ÜBERSICHT XVII

Der Zusammenhang zwischen N- und K_2O-Gehalt im Getreide

Höhe der N-Gabe g	1.2 g P_2O_5 + 2.1 g K_2O			2.4 g P_2O_5 + 4.2 g K_2O		
	Körner		Stroh	Körner		Stroh
	% N	% K_2O	% K_2O	% N	% K_2O	% K_2O
0	1.31	0.78	4.68↑	1.52	0.82	4.75↑
0.2	1.10	0.74	4.39	1.21	0.76	4.40
0.5	1.19	0.71	4.45	1.16	0.77	4.35
0.8	1.36	0.71	3.69	1.25	0.77	4.26
1.2	1.53	0.72	3.62	1.43	0.75	4.48
1.7	1.78	0.72	3.20	1.73	0.80	4.56
2.4	2.16↓	0.78↓	3.09	2.12↓	0.86↓	4.60↓

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass der P_2O_5- und der K_2O-Gehalt im Stroh mit steigenden N-Gaben – wie allgemein bekannt – laufend abnimmt. Die P_2O_5- und K_2O-Gehalte der Körner laufen jedoch nicht gleichsinnig mit. Sie nehmen vielmehr bei höheren N-Gaben wieder zu und gehen damit weitgehend mit dem N-Gehalt der Körner parallel, der bei den geringeren N-Gaben infolge der starken Förderung der Trockensubstanzproduktion zunächst abnimmt und erst bei höheren Gaben stark ansteigt.

Diese Feststellung deutet darauf hin, dass der Phosphorsäure- und Kalieinbau ins Korn nicht nur in Zusammenhang mit der Höhe der P_2O_5- bzw. K_2O-Gabe, sondern auch in Zusammenhang mit der Eiweisseinlagerung gesehen werden muss. Anscheinend ist die Einlagerungskapazität eines Kornes für P_2O_5 und K_2O von der im Korn vorhandenen Stickstoff- bzw. Eiweissmenge abhängig. Ist deren Kapazität für Phosphorsäure und Kali erschöpft bzw. das maximale Eiweiss: P_2O_5- bzw. Eiweiss: K_2O-Verhältnis erreicht, so kann durch noch so hohe Kaliphosphat-gaben nicht mehr wesentlich mehr P_2O_5 und K_2O ins Korn eingelagert werden. Danach ist auch klar, dass eine Überschreitung des maximalen Eiweiss: P_2O_5- bzw. Eiweiss: K_2O-Verhältnisses zu einem Anstau und einer Anhäufung dieser Nährstoffe im Stroh kommen muss.

3. Die ausnutzung der nährstoffe bei verschieden hohen düngergaben

Bekanntlich gilt als Regel, dass der Mangel an einem Nährstoff die Aufnahme der anderen verlangsamt und verringert, während umgekehrt die Zufuhr eines Nährstoffes, solange er noch Ertragssteigerungen bringt, dazu führt, dass die übrigen Nährstoffe beschleunigt und in grösseren Mengen aufgenommen werden. Weniger betont wird aber, dass die einzelnen Nährstoffe eine ganz unterschiedliche Wirkung ausüben. Am deutlichsten ist das zu erkennen, wenn man auf die durchschnittlichen Nährstoffleistungen hinweist, die sich auf grund von Tausenden von Düngungsversuchen ergeben [1 2 3 4 31 32]. Danach leistet 1 kg Stickstoff im Durchschnitt rd. 17 kg Körner und 30 kg Stroh, 1 kg Phosphorsäure rd. 6 kg Körner und 11 kg Stroh, 1 kg Kali etwa 3 kg Körner und 5 kg Stroh. Eine Einheit Reinstickstoff bringt somit im grossen Durchschnitt und in der Mehrzahl der Fälle etwa doppelt bis dreimal so viel Trockenmasse wie 1 kg Rein-

P_2O_5 und 4–6 mal so hohe Mehrerträge wie 1 kg Rein-K_2O. Diese Unterschiede bedingen naturgemäss, dass die Stickstoffdüngung auf die Aufnahme der Hauptnährstoffe P_2O_5 und K_2O einen viel stärkeren Einfluss hat als umgekehrt. Deutlich ist dies zu erkennen, wenn man die jeweilige Mehraufnahme an Nährstoffen durch eine zusätzliche Düngung von jeweils 10 kg N, 10 kg P_2O_5 oder 10 kg K_2O zu Getreide unter Heranziehung durchschnittlicher Nährstoffgehalte [19] und Nährstoffleistungen [1 2 3 4 14 31] betrachtet.

ÜBERSICHT XVIII

Mehraufnahme an Nährstoffen bei zusätzlicher Düngung des Getreides mit jeweils 10 kg N, 10 kg P_2O_5 oder 10 kg K_2O

Zusätzliche Düngung	Durchschnittlicher Mehrertrag, kg		Mehraufnahme in kg/ha in Korn + Stroh		
	Körner	Stroh	N	P_2O_5	K_2O
10 kg/ha N . . .	173	306	4.0	1.9	5.0
10 kg/ha P_2O_5. .	62	112	1.4	0.7	1.8
10 kg/ha K_2O. .	28	53	0.7	0.35	0.8

Aus diesen Zahlen geht hervor, welche dominierende Stellung der Stickstoff bei der gegenseitigen Beeinflussung der Nährstoffaufnahme ausübt. Infolge seiner hohen Leistung kann die absolute P_2O_5- und K_2O-Aufnahme durch ihn unter durchschnittlichen Verhältnissen stärker gesteigert werden als selbst durch erhöhte Kali- und Phosphatgaben.

Eine stärkere P_2O_5- und K_2O-Aufnahme bei höheren N-Gaben bedeutet gleichzeitig eine höhere P_2O_5- und K_2O-Ausnutzung. Diese Tatsache lässt sich z.B. anhand mehrerer Ergebnisse von N-Steigerungsversuchen, die auf unserem Versuchsfeld zu Getreide durchgeführt worden sind, eindrucksvoll demonstrieren (Übersicht 19).

Damit ist angedeutet, dass bei höherer Düngungsintensität mit engerem Nährstoffverhältnis tatsächlich die Nährstoffe P_2O_5 und K_2O ökonomischer von der Pflanze verwertet werden. Dem Boden verbleiben dadurch auf die Dauer gesehen weniger Nährstoffe zum Festlegen, was gerade bei der Phosphorsäure von wesentlicher Bedeutung ist.

Praktisch läuft es also bei engerem N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis darauf hinaus, dass im Laufe einer oder mehrerer Fruchtfolgen

1. die Bodenvorräte an P_2O_5 und K_2O mehr herangezogen werden,
2. die Dünger-P_2O_5 bzw. das Dünger-K_2O besser genutzt wird,

ÜBERSICHT XIX

Die P_2O_5- und K_2O-Aufnahme und -Ausnutzung bei steigenden N-Gaben zu Getreide

Frucht	Erntemasse mit 14% Wasser dz/ha		Nährstoffaufnahme kg/ha		Nährstoffausnutzung in % *	
	Körner	Stroh	P_2O_5	K_2O	P_2O_5	K_2O
a) *Winterroggen 1951*						
Ungedüngt	23	36	35	53	—	—
PK **	23	36	35	57	—	5.0
PK + 30 kg N/ha	27	41	41	70	10.0	21.2
PK + 60 kg N/ha	35	51	51	83	26.6	37.5
b) *Hafer 1951*						
Ungedüngt	27	31	36	96	—	—
PK **	27	32	40	108	6.6	15.0
PK + 30 kg N/ha	35	36	43	131	11.7	43.7
PK + 60 kg N/ha	39	40	54	133	30.0	46.2
c) *Sommergerste 1951*						
Ungedüngt	21	18	26	35	—	—
PK **	21	18	28	47	3.3	15.0
PK + 30 kg N/ha	28	25	29	67	5.0	40.0
PK + 60 kg N/ha	32	30	36	80	16.6	55.2
d) *Winterroggen 1952*						
Ungedüngt	15	32	24	44	—	—
PK **	15	31	25	43	2.0	—
PK + 30 kg N/ha	22	47	32	66	16.0	27.4
PK + 60 kg N/ha	27	55	38	89	28.0	56.3

* Zur Ermittlung dieser Zahlen sind die Unterschiede zwischen „Ungedüngt" und „NPK" benutzt worden. Diese Rechnungsweise ist hier berechtigt, weil die Volldüngung NPK als Einheit angesehen wurde. Im übrigen zeigt diese Rechnungsart, dass P_2O_5 in der Volldüngung NPK im Vergleich zu Ungedüngt wesentlich besser ausgenutzt werden kann, als bisher auf grund der üblichen Rechnungsweise angenommen wurde.

** PK = 60 kg P_2O_5 und 80 kg K_2O je ha.

3. bei der Düngung, bezogen auf die Einheit Stickstoff, tatsächlich eine gewisse Einsparung von P_2O_5 und K_2O möglich ist.

Voraussetzung für die effektive Auswirkung dieser günstigen Einflüsse eines höheren N-Anteils in der Volldüngung ist natürlich, dass die für die Pflanzen zum optimalen Wachstum notwendigen P_2O_5- und K_2O-Mengen auch tatsächlich vorhanden sind. Diese Voraussetzung dürfte aber, wie sich aus den Untersuchungen des Absatzes 4 ergibt, in Betrieben mit intensiver NPK-Düngung fast immer gegeben sein. Bei extensiver Düngung und auf sehr PK-armen Böden können diese Vorteile dagegen nicht genutzt werden. Sie kehren sich dort sogar ins Gegenteil um.

4. Die Nährstoffbilanz bei verschieden hoher Düngungsintensität

Mit dem Engerwerden des Nährstoffverhältnisses in der Düngung tritt die Frage auf, ob damit nicht ein Raubbau mit den Nährstoffen P_2O_5 und K_2O im Boden getrieben wird. Um hierauf eine Antwort geben zu können, ist es notwendig, die Nährstoffbilanzen verschiedener Intensitätsstufen zu betrachten.

Den Verlauf einer solchen Bilanz kann man besonders exakt an den Ergebnissen eines Gefässversuches demonstrieren. Daher führen wir die Versuche, die bereits in Übersicht XII in den Grundlagen näher erläutert wurden, nochmals zur bilanzmässigen Betrachtung an:

Übersicht XX

Die Nährstoffbilanz bei verschiedenem Intensitätsgrad der Düngung (Frucht: Hafer)
N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis = 1 : 1 : 1.75

Intensität der Düngung	Nährstoffüberschuss (+) bzw. -fehlbetrag (—) in mg					
	N		P_2O_5		K_2O	
	Boden I	Boden II	Boden I	Boden II	Boden I	Boden II
Ungedüngt . . .	—114	— 20	—191	— 20	—622	— 73
gering (0.2 g N) .	—105	+102	—221	+ 81	—885	+ 14
mittel (0.5 g N) .	— 13	+126	— 52	+152	—913	+ 66
hoch (0.8 g N) . .	+ 74	+215	+ 39	+308	—864	+ 288
s. hoch (1.7 g N) .	+ 63	+818	+332	+994	+112	+1331

Aus diesem NPK-Steigerungsversuch, übrigens auch aus Versuchen auf PK-ärmeren Böden [28], geht hervor, dass das N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis 1 : 1 : 1.75 die Nährstoffbilanz bei den 3 Intensitätsstufen ganz verschieden beeinflusst hat. Bei geringerer Düngerintensität führte das Nährstoffverhältnis von 1 : 1 : 1.75 zu einer P_2O_5- und K_2O-Verarmung, bei hohen dagegen zu einer Anreicherung. Bei Stickstoff gestaltet sich die Bilanz bei intensiver Düngung ebenfalls positiv. Diese positive Bilanz kann in der Praxis jedoch vielfach nicht in Rechnung gestellt werden, weil Stickstoff-Überschuss während der vegetationslosen Zeit je nach der Bodenart mehr oder weniger stark mit dem Sickerwasser verlustig geht. Für die Praxis bedeutet daher eine hohe NPK-Düngung hauptsächlich nur eine P_2O_5- und K_2O-Anreicherung.

Dieser aus der bilanzmässigen Betrachtung von Gefässversuchen zu ziehende Schluss lässt sich auch durch Feldversuchsergebnisse

beweisen. Wir ziehen dazu die Ergebnisse von rd. 460 Nitrophoska-Steigerungsversuchen [9 32] unter Benutzung der durchschnittlichen Nährstoffgehalte heran, die sich aus den Untersuchungen nach M a c h [19] ermitteln lassen (Korn: 0.77% P_2O_5, 0.55% K_2O; Stroh: 0.23% P_2O_5, 1.30% K_2O).

Mit diesem Werten gestaltet sich die Rechnung zu Getreide wie folgt:

ÜBERSICHT XXI

Phosphorsäure-Bilanz des Bodens bei verschiedenem Intensitätsgrad der Düngung *

Intensitätsgrad der Düngung (Höhe der Nitrophoskagabe **)	Höhe der Erträge		errechneter P_2O_5-Entzug kg/ha	Fehlbetrag (—) bzw. Überschuss (+) an Phosphorsäure (P_2O_5)	errechneter K_2O-Entzug kg/ha	Fehlbetrag (—) bzw. Überschuss (+) an Kali
	Korn	Stroh				
Ungedüngt	21.6	39.4	26	—26	63	—63
gering (20 kg N/ha)	25.5	49.5	31	—11	79	—45
mittel (40 kg N/ha .	28.6	55.3	35	+ 5	88	—20
hoch (60 kg N/ha) .	31.8	59.8	38	+22	95	+ 7

* Bei dieser Berechnung ist nicht berücksichtigt, dass sich die Nährstoffgehalte bei steigenden NPK-Gaben ändern. Dieser „Schönheitsfehler" beeinträchtigt die grundsätzlichen Ergebnisse aber nicht, da sich die Nährstoffentzüge höchstens um einige Kilogramm verschieben könnten.

** Nitrophoska hat ein Nährstoffverhältnis von $N : P_2O_5 : K_2O = 1 : 1 : 1.7$.

Man kann gegen die rein bilanzmässige Betrachtung einwenden, dass die absoluten Nährstoffüberschüsse nicht stichhaltig wären, da es auf die Ausnutzung der Nährstoffe ankäme und man nicht weiss, ob diese nicht vom Boden festgelegt werden. Dieser Einwand ist sicherlich z.T. richtig, insbesondere auf sauren, strukturlosen Böden. In Böden mit geordneten Kalkzustand in guter Bodenstruktur führen aber P_2O_5- und K_2O-Gaben, die den Entzug decken, selbst wenn dabei nur mit einem $N : P_2O_5$-Verhältnis von weniger als 1 : 1-0.8 bzw. einem $N : K_2O$-Verhältnis von unter 1 : 1.5 gedüngt wurde, zu einer Anreicherung des Bodens. Ein Beispiel hierfür geben mittelbar auch 50jährige dänische Versuche [10 16], die zeigten, dass jährliche Mineraldüngergaben von 32–40 kg/ha P_2O_5 und 60–100 kg/ha K_2O ausreichten, um volle Ernten und den Nährstoffspiegel über 50 Jahre zu erhalten.

Eine weitere Bestätigung dafür, dass bei hoher Düngungsintensität trotz engem Nährstoffverhältnis eine P_2O_5- und K_2O-Anreiche-

rung stattfinden kann, liefern Ergebnisse, die bei der Untersuchung von intensiv gedüngten Gemüseschlägen und intensiv düngenden Gemüsebaubetrieben gefunden wurden. Nur einige Beispiele seien angeführt: Die Gemüsebaugemeinde Maxdorf/Pfalz (340 ha Gemüseanbaufläche mit Beregnung) hatte 1939 einen mittleren Nährstoffverbrauch von 230 kg N/ha, 56 kg P_2O_5/ha und 120 kg K_2O/ha; 1953 waren es 213 kg N/ha, 57 kg P_2O_5/ha und 136 kg K_2O/ha. Die Stallmistgabe betrug etwa 200 dz je ha und Jahr. Der Betrieb Schlick in Lambsheim mit besserem Lössboden hat schon seit langen Jahren bei Stallmistgaben von ca. 100 dz je ha und Jahr einen jährlichen durchschnittlichen Mineraldüngerverbrauch von 280 kg N/ha, 142 kg P_2O_5/ha und 305 kg K_2O/ha. Auf dem Versuchsfeld der Versuchsstation Limburgerhof befindet sich ein Gemüseschlag, der neben 150 dz/ha Stallmist jährlich seit 6 Jahren im Durchschnitt 240 kg N, 100 kg P_2O_5 und 240 kg K_2O erhielt. Das Nährstoffverhältnis der Düngung betrug also

Nährstoffverhältnis	N : P_2O_5 : K_2O
in Maxdorf 1953	1 : 0.27 : 0.64
bei Schlick (Lambsheim)	1 : 0.50 : 1.10
in Limburgerhof	1 : 0.42 : 1.00

Trotz dieses Nährstoffverhältnisses haben die Gehalte der Böden an Phosphorsäure und Kali nicht abgenommen, sondern eher zugenommen. Neuere Untersuchungen der Gemüseschläge in Maxdorf ergaben nach Egner-Riehm P_2O_5-Gehalte zwischen 41 und 105 mg und K_2O-Gehalte zwischen 39 und 87 mg. Bei Schlick-Lambsheim wurden Werte von 59 bis 71 mg P_2O_5 und 62 bis 67 mg K_2O je 100 g Boden gefunden. Auf dem erwähnten Gemüseschlag der Landw. Versuchsstation Limburgerhof wurden 1954 im Durchschnitt von jeweils 4 Parzellen von 25 qm Grösse bei je 20 Einstichen folgende Nährstoffgehalte gefunden:

Düngungsart. . . .	nur N	0 N (PK)	0 P_2O_5 (NK)	0 K_2O (NP)	NPK
mg P_2O_5	41	58	43	52	57
mg K_2O.	25	36	31	27	32

Diese Ergebnisse von Gemüseschlägen mit intensivster Düngung zeigen am deutlichsten, in welcher Richtung sich die Nährstoffgehalte bei intensiver Düngung trotz engem Nährstoffverhältnis bewegen. Als Betriebsform mit intensivster Düngung können sie aller-

dings nicht ohne weiteres auf landwirtschaftliche Verhältnisse übertragen werden. Zur Bestätigung müssen daher im folgenden noch Bodenuntersuchungs-Ergebnisse von landwirtschaftlichen Versuchsfeldern angeführt werden.

Als erstes Beispiel dient ein 6-feldriger 15-jähriger Mangelversuch auf dem Sandboden der Versuchsstation Limburgerhof. Die durchschnittliche Düngung auf diesem Felde betrug je Frucht 82 kg N, 57 kg P_2O_5 und 102 kg K_2O. Die Anfangswerte betrugen 1938 im Mittel zahlreicher Probenahmen *8.9 mg* P_2O_5 und *20.1 mg* K_2O nach Neubauer. Im Jahre 1954 betrugen die Nährstoffgehalte nach derselben Untersuchungsmethode jeweils im Mittel der sechs Fruchtfolgeschläge bei sechsfacher Wiederholung der Düngungsarten und bei 20 Einstichen je Teilstück:

Düngungsart . .	Ungedüngt	0 N (PK)	0 P_2O_5 (NK)	0 K_2O (NP)	nur N	**NPK**
mg P_2O_5 . . .	8.2	10.9	8.4	8.7	7.4	**9.4**
mg K_2O . . .	20.3	30.1	25.5	17.1	18.7	**24.6**

Als zweites Beispiel sei ein 12jähriger Mangelversuch mit 7 Fruchtfolgeschlägen in Dreihof-Pfalz auf Lehmboden mit einer durchschnittlichen Düngung von 66 kg N, 51 kg P_2O_5 und 102 kg K_2O je Frucht sowie normaler Stallmistgabe herangezogen. Die Anfangsgehalte betrugen 1938 nach Neubauer *6.0 mg* P_2O_5 und *20.6 mg* K_2O. Bei Abschluss des Versuches im Jahre 1949 wurden im Durchschnitt der 7 Schläge bei ebenfalls 6 Wiederholungen der Düngungsarten und sehr exakter Bodenprobenahme folgende Nährstoffgehalte nach Neubauer ermittelt:

Düngungsart . . .	Ungedüngt	0 N (PK)	0 P_2O_5 (NK)	0 K_2O (NP)	NPK
mg P_2O_5	5.4	8.8	5.7	7.0	8.9
mg K_2O	21.7	32.4	28.1	19.4	28.5

Man sieht bei beiden Versuchen, dass trotz relativ engem N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis in der Düngung (1 : 0.7 : 1.25 bzw. 1 : 0.8 : 1.5) im Laufe von 12–15 Jahren eine merkbare und sicher nachzuweisende P_2O_5- und K_2O-Anreicherung stattgefunden hat.

ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von der Tatsache, dass

a) in Deutschland in den letzten Jahrzehnten mit einem immer enger werdenden N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis gedüngt wird,

b) in Betrieben mit intensiver Düngung vielfach ein besonders enges Nährstoffverhältnis herrscht,

wird oft die Frage aufgeworfen, ob diese Veränderungen vom ernährungsphysiologischen Standpunkt aus gerechtfertigt sind. Zu diesem Problem vorgenommene Untersuchungen brachten folgende Ergebnisse:

1. Die Versuche mit verschiedenen Nährstoffverhältnissen in der Düngung zeigen übereinstimmend, dass relativ die Anteile an P_2O_5 und K_2O in einer Volldüngung um so mehr zurücktreten können, je höher die Stickstoffgabe ist, ohne dass Ertragseinbussen zu befürchten sind. Die Ursache hierfür ist im Ertragsgesetz, d.h. im grundsätzlich verschiedenen Verlauf der Ertragskurven der Nährstoffe P_2O_5 und K_2O gegenüber Stickstoff, zu suchen.

2. Der optimale Kornproduktionsfaktor wird bereits durch verhältnismässig niedrige P_2O_5- und K_2O-Gaben und bei steigenden PK-Gaben wesentlich früher erreicht als der optimale Kornertrag. Bei der Bemessung der Kaliphosphatdüngung und bei der Wahl des N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnisses in der Düngung brauchen somit keine ungünstigen Rückwirkungen auf das Korn : Stroh-Verhältnis befürchtet zu werden, sofern man den PK-Anteil in der Volldüngung (NPK) so hoch bemisst, dass bei den gegebenen Umweltbedingungen der optimale Kornertrag erreicht wird.

3. Die Nährstoffe N, P_2O_5 und K_2O werden bei hohen Düngergaben in einem anderen Verhältnis aufgenommen als bei geringen, auch wenn das Nährstoffverhältnis in der Düngung dasselbe bleibt.

4. Bei intensiver Düngung wird der Nährstoff, der sich im ungedüngten Zustand im Minimum befindet, im Verhältnis zu den anderen am stärksten aufgenommen. Da es auf unseren Mineralböden am meisten an Stickstoff mangelt, so folgt daraus, dass bei hohen Düngergaben in der Regel im Verhältnis zu Stickstoff weniger Kali und Phosphorsäure aufgenommen wird als bei geringem Düngergaben.

5. Die bevorzugte N-Aufnahme bei intensiver Düngung kommt hauptsächlich durch verstärkte Einlagerung ins Korn zustande, während die P_2O_5- und K_2O-Anteile im Korn mit zunehmender Düngungsintensität sukzessiv zurückgehen. Das Stroh nimmt dagegen P_2O_5 und K_2O bereitwillig auf; es kann sich mit diesen Nährstoffen relativ stärker anreichern als mit Stickstoff. Dabei kommt es oft zu einem Luxusverbrauch an P_2O_5 und K_2O. Bei sehr intensiver Düngung sowie auf im Vergleich zum Stickstoffvorrat relativ P_2O_5- und K_2O-reichen Böden scheint Stickstoff auch im Stroh stärker angereichert zu werden als die beiden anderen Nährstoffe.

6. Die Nährstoffe P_2O_5 und K_2O werden bei hoher NPK-Gabe durch die Pflanzen bei engem Nährstoffverhältnis ökonomischer ausgenutzt als bei einem weiten. Auf die Dauer gesehen verbleiben somit bei engem N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis dem Boden weniger Kali- und Phosphatmengen zum Festlegen bzw. zum Auswaschen. Praktisch bedeutet dies, dass bei intensiver Düngung, bezogen auf die Einheit Stickstoff, bei engem Nährstoffverhältnis tatsächlich eine Einsparung von P_2O_5 und K_2O möglich ist.

7. Steigende Düngergaben mit konstantem Nährstoffverhältnis wirken sich je nach ihrem Intensitätsgrad ganz verschieden auf die Nährstoffbilanz

aus. Geringe NPK-Düngung führt z.B. bei einem N : P_2O_5 : K_2O-Verhältnis von 1 : 1 : 1.7 rein rechnerisch zu einer P_2O_5- und K_2O-Verarmung des Bodens, hohe dagegen zu einer Anreicherung an diesen Nährstoffen.

8. An praktischen Beispielen wurde gezeigt, dass eine dauernde intensive NPK-Düngung auch bei engem Nährstoffverhältnis tatsächlich zu einer mit Bodenuntersuchungsmethoden nachweisbaren Vermehrung an pflanzenaufnehmbaren Nährstoffen führt.

9. Die Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass die bei hohen Düngergaben in der Praxis feststellbare Verschiebung des Nährstoffverhältnisses zugunsten von Stickstoff nicht nur wirtschaftliche Vorteile bringt, sondern auf Mineralböden mit einigermassen geordnetem Nährstoffzustand pflanzenphysiologisch sogar berechtigt, ja notwendig ist.

Eingegangen am 19. September 1955.

SCHRIFTTUM

1 Asdonk, T. u. Jacob, A., Zusammenfassung der Ergebnisse der in den Jahren 1935–1938 durchgeführten Kalidüngungsversuche. Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **31** (76), 325 (1943).

2 BASF, Was leistet der Stickstoff im Roggenbau? Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. **39** (84), 137 (1947).

3 BASF, Was leistet der Stickstoff im Gerstenbau? Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. **39** (84), 227 (1947).

4 Biederbeck, A., Keese, H. u. Oelsen, H. v., Was leistet der Stickstoff im Haferbau? Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **28** (73), 57 (1942).

5 Blank, E. u. Heukeshoven, W., Ein Beitrag zur Frage nach dem Einfluss des Nährstoffverhältnisses in der Düngung auf Hafer und Gerste. J. Landwirtsch. **82**, 61 (1934).

6 Boguslawski, E. v., Vömel, A. u. Reichelt, G., Nährstoffverhältnis in der Düngung und Ertragsbildung. Z. Acker- u. Pflanzenbau **97**, 267 (1954).

7 Boguslawski, E. v., Das Zusammenwirkung der Wachstumsfaktoren bei der Ertragsbildung. Z. Acker- u. Pflanzenbau **98**, 145 (1954).

8 Buchner, A. u. Höhenberger, F., Versuche über den Anbau von Braugerste. Landwirtsch. Wochenblatt (München) 20/21 (1950).

9 Buchner, A., 25 Jahre Nitrophoska. Ratschläge für den Bauernhof, Heft 8 (1952).

10 Dorph-Petersen, K., Der Boden als Phosphorsäurequelle für Pflanzen. Tidskr. Planteavl **57**, 553 (1954).

11 Ehrenberg, P. u. Buchner, A., Versuche über den Anbau von Braugerste im Jahre 1948. Landwirtsch. Wochenblatt (München) Nr. 9 (1949).

12 Gebhardt, H., Über den Einfluss von Kali und Kalk auf den Pflanzenertrag und die Kaliaufnahme. Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **31** (76), 263 (1943).

13 Gericke, S., Die Düngewirkung der Phosphorsäure bei verschiedener Stickstoffernährung der Pflanzen. Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **32** (77), 223 (1943).

14 Gericke, S., Düngemittel und Düngung in der deutschen Landwirtschaft. Verlag W. Cronbach, Berlin 1948.

15 Hofmann, E. u. Amberger, A., Die Wirkung der N-Düngung bei verschiedenen Winterweizen- und Sommergerstensorten. Z. Pflanzenbau u. Pflanzenschutz **4** (48), 124 (1953).

16 Iversen, K., Bodenanalysen und Feldversuch. Kurz und bündig **7**, 302 (1954).
17 Jacob, A., Mathematische Betrachtung von Düngungsproblemen auf grund des Mitscherlich'schen Wirkungsgesetzes der Wachstumsfaktoren. Z. Pflanzenbau u. Pflanzenschutz **5** (49), 130 (1954).
18 Keese, H., Über den Einfluss verschiedener Wasser- und Phosphorsäureversorgung auf die Eiweissbildung im Hafer. Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **31** (76), 282 (1943).
19 Mach, E. u. Herrmann, R., Nährstoff- und Aschenanalysen von wirtschaftseigenen Futtermitteln. Landwirtsch. Vers. Stat. **119**, 67 (1934).
20 Mitscherlich, E. A. Bogulawski, E. v. u. Hutmann, A., Schriften Königsberg. Gelehrten Ges. **12**, H. 2, 74 (1935).
21 Nehring, K., Der Einfluss von Nährstoff- und Wasserversorgung auf die Eiweissbildung bei Getreide. Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **31** (76), 298 (1943).
22 Nieschulz, A. u. Padberg, K., Betriebswirtschaftliche Untersuchungen über den Handelsdüngeraufwand im Bundesgebiet. Boden u. Pflanze, Heft 4, 8 (1954).
23 Opitz, K., Rathsack, K. u. Morgenroth, E., Über die Bedeutung des Nährstoffverhältnisses bei der Düngung mit mineralischen Düngemitteln. Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk. **4** (49), 210 (1937).
24 Pfaff, C. u. Roth, H., Unveröffentlichter Versuchsbericht der Landwirtsch. Versuchsstation Limburgerhof.
25 Rackmann, K., Über Beziehungen zwischen Pflanzenwachstum, Boden und Nährstoffverhältnis in der Düngung. Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk. **40**, 148 (1935).
26 Rippel, A., Zur experimentellen Widerlegung des Mitscherlich-Baule'schen Wirkungsgesetzes der Wachstumsfaktoren. Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk. A **VIII**, 65 (1926/27).
27 Schmitt, L., Die Phosphorsäure in ihrem Zusammenwirken mit anderen Pflanzennährstoffen. Archiv der DLG **13**, 144 (1954).
28 Schmitt, L., Beiträge zur Frage des Nährstoffverhältnisses im Nitrophoska. Fortschr. Landwirtsch. **7**, 584 (1932).
29 Schmitt, L. u. Schineis, W., Beiträge zur Frage des Einflusses der Wasser- und Phosphorsäureversorgung auf die Eiweissbildungsmöglichkeit verschiedener Gerstensorten. Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **17** (62), 293 (1940).
30 Schropp, W. u. Arenz, B., Gefässversuche über den Einfluss verschiedener Wasser- und P_2O_5-Versorgung auf den Ertrag und die Eiweissbildung zweier Hafersorten. Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **31** (76), 291 (1943).
31 Ströbele, F., Keese, H. u. Reith, H., Was leistet der Stickstoff im Weizenbau? Bodenkunde u. Pflanzenernähr. **13** (58), 198 (1939).
32 Wiede, W., Was vermögen steigende Nitrophoskagaben bei den wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen zu leisten? Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk. **49** (94), 277 (1950).

Plant and Soil VII, no 4 June 1956

THE EFFECT OF MOLYBDENUM ON RECLAIMED WELSH UPLAND PASTURES

by J. H. WILLIAMS *

Institute of Rural Science, University College of Wales, Aberystwyth

INTRODUCTION

The nutritional value of molybdenum for higher plants was established in 1939 by Arnon and Stout [3] at the University of California and, by 1940 Piper [12] had shown that molybdenum was necessary for grain formation in oats. Johnson, Pearson and Stout [8] found that the nitrate content of plants grown on a molybdenum-deficient soil was higher than that of plants grown in the same soil treated with molybdenum which suggests that it may be required in the reduction of nitrate nitrogen. Oertel *et al.* believe that the low nitrogen-fixing power of *Azotobacter* on normal temperate soils is due to a low molybdenum level in the soil, and this worker has claimed increases in soil nitrogen after the addition of sodium molybdate [11]. The molybdenum requirements of legumes are almost entirely for the nitrogen-fixing mechanism for Mulder [10] and Oertel *et al.* [11] have found that in some cases the nitrogen-deficient legumes are better nodulated than the normal molybdenum-treated plants with their higher percentage of nitrogen. Jensen [7] calculated that 10–25 parts per million of molybdenum in the nodules of lucerne were needed for maximum efficiency and the nodules consistently contained a much higher concentration of molybdenum than did other parts of the plant. Recent evidence by Stephens and Oertel [15], Jensen and Betty [6], Lewis [9] and Watson [19] indicates that alkaline materials increase the availability of molybdenum. Oertel *et al.* [11] demonstrated the marked effect of

* Present address: N.A.A.S. Wales, Trawscoed, Nr. Aberystwyth, Cards, U.K.

soil pH on the availability of molybdenum in Australian soils and they suggested that one of the major benefits of lime for legumes is to increase molybdenum solubility.

Workers in Tasmania had failed to establish good pastures in some districts on an ironstone soil even with liberal dressings of lime, superphosphate and various combinations of the then known essential plant foods. Meanwhile from Australia, Anderson [1, 2] had reported responses to molybdenum, in terms of dry matter yield, occurring in the field and these responses occurred on acid soils in areas of high winter rainfall. In New Zealand also, workers obtained responses to molybdenum on a similar type of soil in which the 'total molybdenum' content was twice as high as in any other soil examined. Evidently the question of availability was involved, and that soil reaction was a major factor in controlling this availability.

EXPERIMENTAL

Trials on reclaimed Welsh upland pastures 1952–53

The trial was carried out on the Dolfor Hills, which lie along the Montgomery-Radnor border at an altitude of 1,300 feet. The hill on which the plots were laid down was ploughed up from Molinia and Nardus-fescue and reseeded in 1944 with a mixture of 10 lb. Italian ryegrass, 8 lb. perennial ryegrass, 12 lb. commercial perennial ryegrass, 2 lb. Alsike clover, 1 lb. Kentish white clover and 1 lb. New Zealand wild white clover.

The manuring at the time of reseeding was 10 cwt. of basic slag (17% total P_2O_5) and approximately 4–5 tons of low grade ground limestone (80% $CaCO_3$) per acre. Since that time, the area has received no fertilisers whatsoever.

The area overlies rock of Silurian origin and the soil is a cultivated shallow podsol derived from soft shales, the leached layer having been mixed with the top peat layer during cultivations. There is no evidence of a bleached layer, but there is a sharp transition to a bright orange-brown light loam, which gradually merges to a greyish-yellowish brown, stony light loam [14].

The experimental plots were laid down on this area in March 1952 in the form of randomised blocks, *i.e.* four treatments replicated three times with and without 1 ton of hydrated lime per acre. The treatments were:

1. Control.
2. 10 cwt. per acre of superphopshate.
3. 1 lb. per acre of sodium molybdate.
4. Superphosphate + sodium molybdate at the above rates.

In order to obtain yield data, a wire cage was placed on each plot, as the whole area was grazed by sheep. After each cutting the cage was moved to

another part of the same plot. The total yield per plot was estimated for the whole season.

Analytical methods

a) Soils. The pH of the soil-water suspension (1 : 2.5) was measured on a Cambridge type meter using the glass-calomel electrode assembly. The exchangeable CaO in the soil was determined by shaking the soil with *N*/2 ammonium nitrate solution in the ratio of 1 : 40 and directly reading the filtered extract on the Eel flame photometer. For phosphate and potash, the soil was shaken with *N*/2 acetic acid solution (1 : 40) and filtered. Phosphate was determined colorimetrically after development of the blue colour produced by the reduction of ammonium phosphomolybdate by stannous chloride. Potash was determined photometrically on the same extract by direct reading on the Eel flame photometer. The conventional Walkley and Black method was used for the determination of organiç matter. The available iron content of the soil was determined by shaking overnight with Tamm's acid oxalate extractant[16], precipitating as the cupferron complex, igniting and weighing as Fe_2O_3.

b) Plant material. The conventional Kjeldahl procedure was adopted for the determination of nitrogen on the finely ground plant material, the ammonia being distilled into 2% boric acid solution and titrated with standard acid. Molybdenum was determined by the dithiol method of Piper and Beckwith[13] which was slightly modified in that carbon tetrachloride was used as a solvent for the extraction of the green molybdenum-dithiol complex.

RESULTS

Yields of dry matter

The mean yield of dry matter in lb./acre for 1952 and 1953 are shown in the following tables and illustration (Fig. 1).

TABLE I

Mean yields of dry matter from 5th May to 22nd September 1952. Yields expressed in lb./acre

Treatment	Limed			Unlimed			Effect of lime	
	—Mo	+Mo	Effect of Mo	—Mo	+Mo	Effect of Mo	—Mo	+Mo
—P	4728	4932	+204	4476	4892	+416	−252	−40
+P	5632	5888	+256	5728	6580	+852	−96	−692
Effect of P	+904	+956	—	+1252	+1688			

At $p = 0.05$, $F = 37.7$ *i.e.* experiment is significant at the 5% level. S.E. (mean) ± 116. Least Significant Difference = 352.

TABLE II

Mean yields of dry matter from 22nd March to 26th August 1953.
Yields expressed in lb./acre

Treatment	Limed			Unlimed			Effect of lime	
	—Mo	+Mo	Effeet of Mo	—Mo	+Mo	Effect of Mo	—Mo	+Mo
—P	5176	4876	—300	4288	4540	+252	+888	+336
+P	5975	5976	+ 1	5632	6220	+588	+343	—244
Effect of P	+ 799	+1100		+1344	+1680			

At $p = 0.05$, $F = 21.10$, *i.e.* experiment is significant at the 5% level. S.E. (mean) = ± 157. Least Significant Difference = 476.

The results in Table I show that, in 1952, molybdenum has given a very significant increase in yield of dry matter where no lime was applied and this was more pronounced in the presence of phosphate. In the absence of phosphate, sodium molybdate has increased the yield of dry matter by 416 lb. per acre (9–10%) over the control, and, in the presence of phosphate, by 852 lb. per acre (14–15%) over the phosphate-treated plots where no lime was applied. The response to molybdenum where lime was applied was not significant but, nevertheless, it did give an increase of 204 lb. per acre of dry matter in the absence of phosphate and 256 lb. per acre where phosphate was applied. This may be due to the fact that the hydrated lime has slightly increased the availability of soil molybdenum. No significant response to liming was obtained in 1952. However, hydrated lime alone gave an increase of 252 lb. of dry matter per acre over the control but, in the presence of molybdenum, liming only gave an incrrease of 40 lb. of dry matter per acre. When however, phosphate was applied, there was a negative response from liming and this negative effect was much more marked in the presence of molybdenum. Superphosphate has given a very significant response with and without lime over the 'No-phosphate 'plots, a greater response being obtained in the absence of lime. It can be seen that molybdenum again influences this phosphate response, which was greater in the presence than in the absence of molybdenum. From these results it is apparent that a phosphate-molybdenum interaction exists.

The results for 1953, shown in Table II are not as significant as for the previous year. On the unlimed area, molybdenum has given an increase in dry matter yield of 252 lb. per acre (5-6%) over the

control in the absence of phosphate, and a significant increase of 588 lb. per acre (10-11%) over the phosphate treated plots in the presence of phosphate. On the limed plots molybdenum depressed

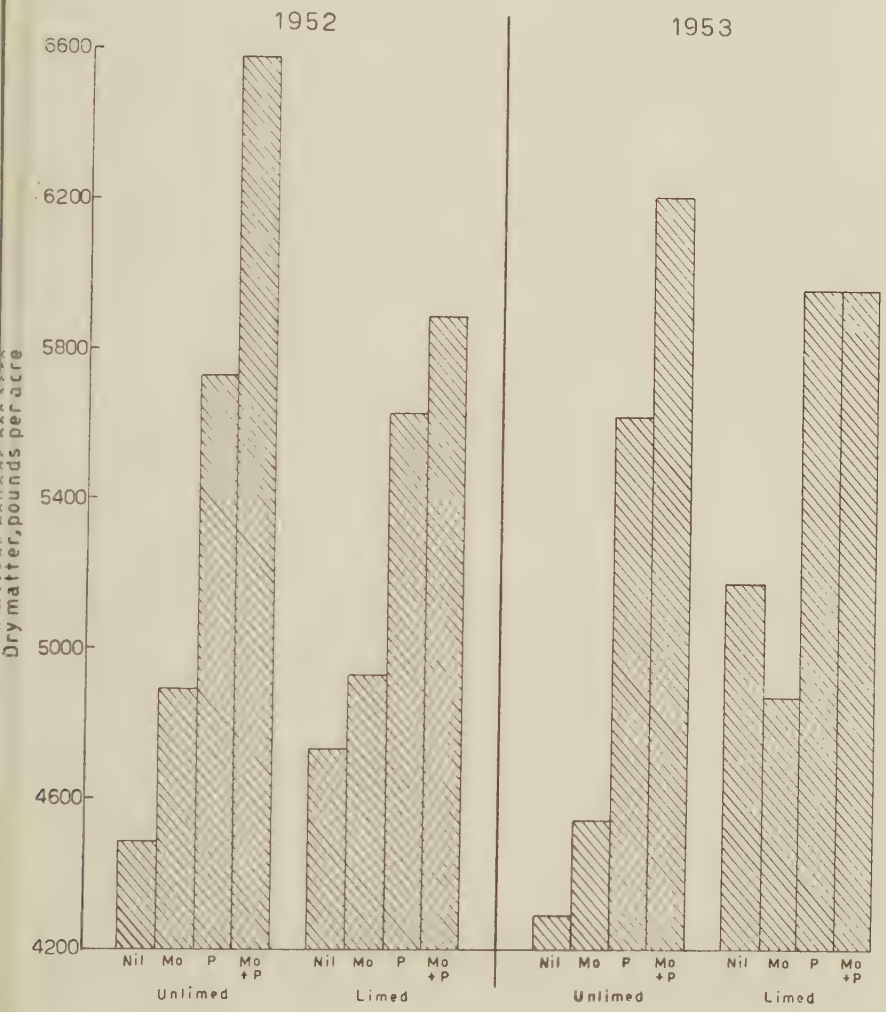


Fig. 1. Seasonal mean yields of dry matter. 1952–1953.

the yield by 300 lb. per acre of dry matter in the absence of phosphate whereas in the presence of phosphate the effect of molybdenum was nil. There was a better response to hydrated lime in 1953 than in

1952 and, when lime alone was applied, there was a very significant increase in the yield of dry matter of 888 lb. per acre, whereas in the the presence of molybdenum, liming only gave an increase of 336 lb. per acre of dry matter. It was expected that the full benefit from liming would not be realised until the second year. Again, as in 1952, the effect of lime was less pronounced when applied in conjunction with phosphate. In the absence of molybdenum there was an increase of 343 lb. of dry matter per acre due to liming and, in the presence of molybdenum, a decrease of 244 lb. of dry matter per acre. There was a very significant response to phosphate again in 1953, on both limed and unlimed plots. In both cases there was a very much better response to phosphate when molybdenum was also present.

Nitrogen content of white clover

Pure samples of white clover were separated from the mixed herbage cut on July 30th 1952, dried, ground and the nitrogen estimated on the dry matter. The percentages of nitrogen and crude protein (% N × 6.25) are shown in the following table.

TABLE III

The nitrogen and protein contents of white clover from the unlimed plots cut on July 30th 1952
(The results are means of 3 replicate plots)

Treatments	Control	Sodium molybdate	Super-phosphate	Sodium molybdate + super-phosphate
% Nitrogen	4.25	4.28	4.35	4.57
% Protein (% N × 6.25)	26.6	26.8	27.2	28.6
Response		+ 0.2	+ 0.6	+ 2.0

F test shows results to be significant at the 5% level. S.E. = ± 0.18. Least Significant Difference = 0.62.

Molybdenum alone has had practically no effect on the percentage of nitrogen and crude protein over the control. Superphosphate has given an increase of 0.6% protein over the control, while molybdenum and superphosphate has given a very significant increase of 1.4% protein over the phosphate treated plots. These results strongly suggest that there has been an increased fixation of nitrogen either in the clover nodules by *Rhizobium*, or by the free-living *Azotobacter*

of the soil or both. This increase in nitrogen, no doubt, is partly due to the effect of superphosphate on this soil which was originally very low in phosphate but, when sodium molybdate is applied in conjunction with superphosphate, the increase in the nitrogen content of the clovers is much greater. This again suggests the probability of an interaction between phosphate and molybdate as they effect this process of nitrogen fixation upon which molybdenum has a catalytic effect.

The molybdenum content of the herbage and white clover

Altogether 72 samples of mixed herbage were analysed for their molybdenum content by a modified Piper and Beckwith method [13]. The mean values for three cuts are shown in the following table.

TABLE IV

The molybdenum content of the mixed herbage for 1952.
Milligrams of Mo per kg of dry matter

Treatment	Limed			Unlimed		
	—Mo	+Mo	Effect of Mo	—Mo	+Mo	Effect of Mo
No P added						
Blk. 1.	1.1	7.5		0.9	6.4	
2.	0.8	9.0		0.7	4.9	
3.	1.1	8.5		0.7	5.9	
Mean	1.0	8.3	+7.3	0.8	5.7	+4.9
P added						
Blk. 1.	1.1	5.9		0.7	4.4	
2.	0.8	8.1		0.8	4.1	
3.	0.9	8.0		0.5	5.3	
Mean	0.9	7.3	+6.4	0.7	4.6	+3.9

F test shows the results to be significant at the 5% level. S.E. (mean) = ± 0.37. Least Significant Difference = 1.12.

It can be seen from Table IV that a dressing of 1 lb. of sodium molybdate per acre has given a very significant increase in the molybdenum content of the mixed herbage. This increase is greater when the molybdate is applied with 1 ton of hydrated lime per acre even though lime alone has enhanced molybdenum uptake only very slightly. By November 1952 the pH of the soil from the lime-treated plots had been raised by 0.8, *i.e.*, from 4.8 to 5.6. There is no doubt therefore that the applied molybdenum is rendered more available for a longer period of time at this higher pH of 5.6. It has been suggested by Davies and Grigg [4], that when the pH

is up to 6.5, a soil available-molybdenum figure of 0.05 ppm is adequate, whereas at pH 5.0 the response level is approximately 0.20 ppm of available molybdenum. This is in agreement with the observation that a molybdenum deficiency may be corrected by an application of from 1–3 tons per acre of ground limestone according to circumstances, or by applying sodium molybdate.

It can also be seen that, when phosphate was applied, the uptake of added molybdenum was enhanced after liming. On both limed and unlimed plots the effect of phosphate has been to decrease the molybdenum content of the herbage by approximately 1 ppm in the presence of applied molybdate, but the total recovery of molybdenum was much greater in the presence of phosphate due to the higher yields that were obtained.On plots which had not received sodium molybdate the effect of phosphate on the molybdenum content of the herbage was only very slight, viz. to decrease it by 0.1 ppm, but the total uptake was far greater due to the highly significant response obtained with superphosphate.

12 samples of white clover from each of two cuts taken in 1952 were analysed by a modified Piper and Beckwith method[13] and the molybdenum contents are shown in Table V below. In view of the better response to molybdenum in terms of dry matter yield on the unlimed plots, it was decided to examine the clover from these plots cut in July and September 1952, as, under the circumstances,

TABLE V

The molybdenum content of white clover. *Unlimed*
(Milligrams per kg of dry matter)

	Date of cutting					
	30/7/52			22/9/52		
	—Mo	+Mo	Response	—Mo	+Mo	Response
No P added						
Blks. 1.	0.05	5.3		0.4	11.4	
2.	0.2	7.6		0.4	3.4	
3.	0.2	3.1		0.2	5.6	
Mean	0.15	5.5	+5.35	0.33	6.8	+6.47
P added						
Blks. 1.	0.1	3.5		0.2	1.1	
2.	0.2	1.6		0.3	3.6	
3.	0.2	6.6		0.2	4.8	
Mean	0.17	3.9	+3.73	0.23	3.2	+2.97

F test shows the results to be significant at the 5% level. S.E. (mean) = ± 1.54. Least Significant Difference = 4.67.

it was not possible to carry out a separation of the herbage from all 24 plots.

In general it can be seen that the molybdenum content of the clovers was lower than that of the mixed herbage which was dominantly Agrostis. For both cuts the increase in molybdenum uptake was greater in the absence than in the presence of phosphate. In the case of clovers it may be that the molybdenum is accumulated in the nodules which fact would make it rather difficult to correlate these values with the amount of molybdenum which is required for active nitrogen fixation in the nodule. British workers state that normal herbage should contain 1 -3 ppm and Walsh *et al.* suggest that normal pastures contain 0.5–3.0 ppm of molybdenum [18]. In Australia however, subterranean clover, grown on molybdenum-deficient soils where spectacular increases in yield were obtained from top dressing with sodium molybdate, contained less than 0.1 ppm.

Soil nutrient status

The results of analysis of soil samples taken from the experimental area before the trial was laid down showed that the soil had a pH of approximately 4.8 and an exchangeable-lime content of 150 mg CaO per 100 g of air dry soil. The organic-matter content of the soil was approximately 11 -12 per cent. The readily soluble soil phosphate ranged from 0.8 to 1.4 mg P_2O_5 per 100 g which, according to our classification, would be placed in the category of 'very low'. The potash status ranged from 20 to 29 mg K_2O per 100 g which would be classified as 'high'.

The plots were soil sampled again in November of 1952 and the pH was now approximately 5.6 and the exchangeable-lime content up to 375 mg CaO per 100 g on plots which had received a dressing of 1 ton per acre of hydrated lime. Where lime had been applied, the application of 10 cwt. per acre of superphosphate had raised the readily soluble soil phosphate over 6.0 mg P_2O_5 per 100 g (medium high) but, in the absence of lime, the figure reached was only 2.5 mg per 100 g (low). By July 1953, when the plots were sampled again, the pH and exchangeable-lime content were slightly higher than in November 1952 whereas the readily soluble phosphate remained practically the same.

Botanical composition of the sward

The sward on the experimental area, grazed entirely by sheep,

consisted of approximately 20% ryegrass, 45% Agrostis, 12% Yorkshire fog, 10% non-gramineous species and 10% of white clover. Botanical analysis of the sward, using the pin-point method, was carried out in October of 1952 and again in June of 1953. Although these results have not been statistically analysed there is no doubt that the phosphate has encouraged the better species of ryegrass and clover and, by the summer of 1953, there was an indication that sodium molybdate in the presence of phosphate had a beneficial effect in that it slightly increased the clover percentage on those plots which had not received lime.

DISCUSSION

The results recorded in this paper is the first attempt to study the effect of molybdenum on a podsolic soil type of common occurrence in the hilly areas of Wales. Molybdenum deficiency symptoms in broccoli and cauliflowers have frequently been found in areas in South Wales devoted to the growing of early potatoes and market garden crops. These were invariably on acid soils and were tackled by liming. There are reasons to believe that this problem of molybdenum deficiency is undoubtedly widespread on many similar types of soils. Mulder[10] has reported pronounced responses in leguminous crops to added molybdenum. These responsive soils, often rich in organic matter and sometimes sandy in character with a pH value between 5 and 6, were all high ironstone-containing soils. Mulder also found molybdenum deficiency occurring in cauliflowers on strongly acid soils of a different type, which soils he found to be sometimes relatively rich in available molybdenum as contrasted with the ironstone soils, and he suggested that the high concentration of available manganese in these very acid soils inhibited the uptake of molybdenum by the cauliflower.

It is apparent from work carried out by Mulder[10] in the Netherlands and from the present work that three factors, viz., high iron content, phosphate deficiency, and high acidity together with a high rainfall, are no doubt, very closely connected with molybdenum deficiency.

It has been suggested by Walker, Adams and Orchison[17] that if molybdenum deficiency is corrected by applications of sodium molybdate, normal phosphate responses may be obtained

on acid soils, suggesting that phosphate is equally available at the lower pH, which fact was supported by the data presented in the paper published by the above workers. From the present work there is no doubt that the response to phosphate is always greater when molybdenum has been applied irrespective of whether lime was present or absent. The greatest response to phosphate was obtained on the unlimed area when superphosphate was applied in conjunction with sodium molybdate. Soil analysis shows that, after the first year, the readily soluble soil phosphate was only 2.6 mg per 100 g on the unlimed area, whereas on the limed area the plots contained over 6.0 mg P_2O_5 per 100 g. Further experiments are necessary to determine whether the results are of general application on this type of soil, *i.e.* whether high yields can be obtained without lime by applying phosphate and molybdate together.

Very little or no benefit was derived from the hydrated lime in the first year and there was in fact a significant decrease in dry matter yield due to liming, on plots which had received phosphate and molybdenum. In one of their trials Walker, Adams and Orchiston[17] found that molybdenum gave the biggest response in the absence of lime, with a general tendency for the response to fall as the amount of lime was increased. This effect, which was in the second cut, was exactly opposite to that of the first cut where increasing responses to molybdenum were obtained with increasing rates of lime. They suggested that, in this trial, it was probably manganese toxicity and manganese - molybdenum antagonism, rather than straight molybdenum deficiency that were responsible for the poor clover growth at 'no lime — no molybdenum'.

In the second year of the present trial the effect of lime was very significant only when molybdenum and phosphate were absent. By 1953, the second year, there was an increased response to liming and a decreased response to molybdenum as compared with 1952, and there was in fact, no positive response to molybdenum on plots which had received lime. It would appear that, by the second year, this dressing of lime not only stimulated nodulation but also released sufficient native molybdenum from the soil so that added molybdenum gave no further increase in yield. There is still, however, a a negative response to lime on plots which have received phosphate and molybdenum.

We can, therefore, say that this upland soil, which is a cultivated,

slightly peaty podsol, rich in iron, with a pH of 4.8–5.0 and very lo phosphate status, given adequate supplies of phosphate and molyb denum would not benefit from a dressing of 1 ton per acre of hydrate lime. It is quite conceivable that, on these relatively acid grass land soils, provided they contain an adequate supply of calciu for plant growth, an application of phosphate and sodium molybdat would give as good, or even better yields, than would be obtained b applying phosphate and a dressing of lime equivalent to about 1 to per acre of CaO. The latter treatment would be the normal metho of maintaining production on this type of land. If the former wa found of general applicability it would entail a considerable savin in transport and labour, as much of this type of land is not easil accessible to modern spreading machinery.

SUMMARY

The effect of lime, phosphate and molybdenum on the yield and composition of the herbage from a reclaimed upland pasture in Wales was studied. The soil, which is typical of many of our upland areas, was originally podsolic in nature, having only a shallow depth of peat over a rather diffused bleached layer, these having been mixed with the subsoil during cultivations. The pH was approximately 4.8 and the soil phosphate status very low. The main conclusions are:

(1) Dressings of 1 lb. of sodium molybdate per acre gave an increase in dry matter yield of 15% and 10% in the first and second year respectively in the presence of 200 lb. P_2O_5 per acre without lime. In the first year only, sodium molybdate alone also gave an increase of 9–10% in the yield of dry matter. In the presence of lime however, there was no significant response to molybdenum.

(2) Large responses to phosphate were obtained on all plots in the first and second year. These responses were greater when the phosphate was applied in conjunction with molybdate than when applied alone and more especially in the first year on the unlimed plots.

(3) There was no significant response to a dressing of 1 ton per acre of hydrated lime except in the second year when applied alone. Where molybdenum and phosphate had been applied, the response was a negative one.

(4) Molybdenum increased the nitrogen content of white clover by 0.22% in the presence of phosphate.

(5) Liming has enhanced the uptake of both native and added molybdenum by the grasses, the soil pH having been raised from 4.8 to 5.6 and the exchangeable CaO content from 150 to 373 mg per 100 g of soil.

(6) The molybdenum contents of the clovers were generally lower than those of the mixed herbage which may be due to the fact that molybdenum is accumulated in the nodules.

ACKNOWLEDGEMENTS

Grateful acknowledgement is made to Professor W. Ellison and Dr. W. M. Ashton of the University College of Wales, Aberystwyth for their guidance, and the interest which they have taken in his work. The writer is also indebted to Dr. Rice Williams for his criticism, advice and encouragement during the course of this experiment. Thanks are also due to the laboratory staff of the Chemistry Department of the National Agricultural Advisory Service, Trawscoed, Aberystwyth for their co-operation and assistance in the analysis of numerous samples.

Received October 29, 1955.

REFERENCES

1 Anderson, A. J., Molybdenum deficiency on a South Australian ironstone soil. J. Australian Inst. Agr. Sci. **8**, 73–75 (1942).
2 Anderson, A. J., Molybdenum in relation to pasture improvement in South Australia. J. Counc. Sci. Ind. Research Australia **19**, 1–15 (1946).
3 Arnon, D. I. and Stout, P. R., Molybdenum as an essential element for higher plants. Plant Physiol. **14**, 599–602 (1939).
4 Davies, E. B. and Grigg, J. L., Molybdenum and its use in grassland production. New Zealand J. Agr. **87**, 561–567 (1953).
5 Ferguson, W. S., Lewis, A. H. and Watson, S. J., The teart pastures of Somerset. 1. The cause and cure of teartness. J. Agr. Sci. **33**, 44–51 (1943).
6 Jensen, H. L. and Betty, R. C., Nitrogen fixation in leguminous plants. Proc. Linnean Soc. N. S. Wales **68**, 1–8 (1943).
7 Jensen, H. L., Nitrogen fixation in leguminous plants: 7. The nitrogen fixing capacity of root nodule tissue in Medicago and Trifolium. Proc. Linnean Soc. N. S. Wales **72**, 265–291 (1948).
8 Johnson, C. M., Pearson, C. A. and Stout, P. R., Molybdenum nutrition of crop plants: 2. Plant and soil factors concerned with molybdenum deficiencies in crop plants. Plant and Soil **4**, 178–196 (1952).
9 Lewis, A. H., The teart pastures of Somerset: 2. Relation between soil and teartness. J. Agr. Sci. **33**, 52–57 (1943).
10 Mulder, E. G., Molybdenum in relation to the growth of higher plants and microorganisms. Plant and Soil **4**, 368–415 (1954).
11 Oertel, A. C., Prescott, J. A. and Stephens, C. G., The influence of soil reaction on the availability of molybdenum to subterranean clover. Australian J. Sci. **9**, 27–28 (1946).
12 Piper, C. S., Molybdenum as an essential element for plant growth. J. Australian Inst. Agr. Sci. **6**, 162–164 (1940).
13 Piper, C. S. and Beckwith, R. S., A new method for the determination of small amounts of molybdenum in plants. J. Soc. Chem. Ind. (London) **67**, 374–379 (1948).
14 Soil Survey Research Board, Report No. 1, 11 (1950).
15 Stephens, C. G. and Oertel, A. C., Responses of plants to molybdenum on the Cressy Shaley Clay-Loam. J. Counc. Sci. Ind. Research Australia **16**, 69–73 (1943).
16 Tamm, O., The determination of the inorganic colloidal constituents of soils. Medd. Statens Skogsförsöksanstalt **19**, 387–404 (1922).

17 Walker, T. W., Adams, A. F. R. and Orchiston, H. D., The effects and interactions of molybdenum, lime and phosphate treatments on the yield and composition of white clover grown on acid, molybdenum responsive soils. Plant and Soil **6**, 201–220 (1955).

18 Walsh, T., Neenan, M. and O'Moore, L. B., The importance of molybdenum in relation to some cropping and livestock problems under Irish conditions. J. Dept. Agr.(Ireland) **48**, 32–43 (1951–52).

19 Watson, J., The effect of dressings of cobalt and limestone on the molybdenum content of some South Ireland pastures. New Zealand J. Sci. and Technol. A **25**, 162–164 (1943).

Plant and Soil VII, no 4 June 1956

NITROGEN-MAGNESIUM RELATIONSHIPS IN CROP PLANTS

by E. G. MULDER *

Agricultural Experiment Station and Institute for Soil Research T.N.O., Groningen, the Netherlands

INTRODUCTION

The uptake, translocation and perhaps the assimilation of cations and anions by plants depend not only on the concentrations and the availability of these ions in the nutrient medium but also on the presence of other cations and anions. The absorption of calcium, for instance, may be depressed by excessive amounts of potassium or magnesium, but favoured by nitrate. Similarly the uptake of phosphate may be depressed by nitrate but increased by ammonium ions. Further examples of interactions between inorganic nutrients are: nitrogen—copper [39 41], sulphate—molybdenum [42 62], manganese—molybdenum [42], and phosphate—molybdenum [42 62]. The former three represent interactions of the antagonistic type, the latter of the synergistic type.

The mechanism of these interactions is not always clear; in many cases it depends apparently on an ion competition on colloidal surfaces, either at the surface of the cell or within the cytoplasm. The competition between ions for binding sites on the hypothetical, metabolically generated, carriers is presumably also of great importance [12 46 47]. The favourable effect of phosphate on molybdenum uptake and translocation within the plant and of calcium on potassium absorption [46 47] are of a different character. So far their functioning is not explained.

If plants are grown under natural conditions such interactions may also be found to have their origin in the soil.

Of the elements essential to plant growth, magnesium is particularly subject to a number of interactions with other nutrient elements. The existence of a calcium—magnesium antagonism was demonstrated as early as 1892 by L o e w [29].

Of much greater practical importance is the hydrogen—magnesium relationship which plays an important role in plant nutrition on light, sandy soils in

* Agronomist of the "Landbouwkundig Bureau der Nederlandse Stikstofmeststoffen-Industrie".

Western Europe [11 13 14 15 19 23 25 28 40 48 54 55 60 61]. A decrease of soil pH due to a prolonged application of ammonium sulphate was found to bring about magnesium deficiency of the crops. The opinions of various authors as to the cause of this phenomenon differ considerably, however. Gehring [14 15] and a number of other German authors [55 60] suppose that the reduced uptake of magnesium by plants growing in acid soils is due to a reduced availability of soil magnesium, owing to a fixation of magnesium by the soil constituents under acid conditions. No evidence in favour of this assumption is, however, presented by these authors. Although a fixation of magnesium in the soil may occur [26 32 40], there is no indication that this happens in light soils at low pH values. It rather takes place in alkaline soils and at a relatively high magnesium level. Smit and Mulder [61], who have made an extensive study of the magnesium nutrition of cereal plants on acid soils, were unable to demonstrate a fixation of magnesium by an acid sandy soil when the latter was incubated for 2½ months at 25°C in a moist condition. The low content of plant-available magnesium in acid soils was attributed by these authors to a leaching of this nutrient element by the winter rains. That considerable amounts of magnesium may be lost from acid soils by leaching was also shown by Schmitt [55].

Van Itallie [20] ascribed the frequent occurrence of magnesium deficiency on acid soils to the interference of H-ions with the uptake of magnesium ions. In addition, an excess of H- and NH_4-ions and of inorganic anions within the plant tissue was assumed by this author to increase the magnesium requirement of the plant. The beneficial effect of nitrate was attributed partly to an increased uptake of magnesium from the soil and partly to its neutralizing effect. Ferrari and Sluijsmans [13] who studied the magnesium nutrition of oats growing under field-experiment conditions, found, that when equal contents of available magnesium were present in the soil, more pronounced symptoms of magnesium deficiency occurred at a low than at a high pH.

The influence of the pH of the nutrient medium and of the kind of nitrogen compound applied, on the uptake of inorganic nutrients has been studied by a number of workers. Arnon [2] grew barley plants in culture solutions with nitrate and ammonium nitrogen, respectively, at different pH values. Nitrate plants were found to have a lower phosphorus content but a higher calcium, magnesium and potassium content than ammonium plants. There were practically no differences in uptake of these elements by plants grown at pH 5, 6 or 6.7. In a subsequent paper Arnon *et al.* [3] studied the effect of the pH of the culture solution on the uptake of inorganic nutrients by tomato, lettuce and Bermuda grass over a relatively short period of time (96 h). In tomato and lettuce, uptake of K, Mg, P and particularly that of Ca was lower at pH 4 than at higher pH values. Nitrate uptake by these plants was not affected by the pH in the range from 4 to 9. In Bermuda grass, uptake of calcium only was depressed by a high hydrogen-ion concentration. Wadleigh and Shive [64] found that the effect of the kind of N supplied, on uptake of cations by maize plants was of much greater importance than that of the pH of the culture solution. The total base content of the ammonium

plants was approximately 80% of that of nitrate plants; with both N-compounds it was constant between pH values from4 to 8. Uptake of calcium was more depressed by the presence of NH_4-ions than that of magnesium and potassium. Michael [33] found that the uptake of magnesium from culture solutions by young maize and rye plants was considerably lower at pH 4.0 than at pH 6.0 or 7.5. Calcium behaved like magnesium, whereas the uptake of potassium and phosphorus was not affected by a low pH of the nutrient solution.

Schuffelen and Loosjes [57 58], working with an artificial colloid (dusarit = H_2SO_4-treated charcoal), found that the activity of the magnesium ions in such a medium was decreased by increasing the amount of adsorbed H-ions and particularly by increasing the amount of adsorbed K-ions. In short-term experiments with oat plants these authors obtained a considerably reduced uptake of potassium from media with colloids and K-H-acetates, respectively, with decreased pH.

Olsen [45] studied the uptake of Cl-, NO_3-, H_2PO_4- and K-ions at various pH levels by rye from single-salt solutions containing very low concentrations of these ions. The uptake of anions attained maximum values in the pH range 4.0–5.5. From 5.5 to 8.0 it was found to be considerably reduced due to competition with HCO_3-ions. When this competition was eliminated, maximum values for nitrate uptake were obtained between pH 4.0 and 8.0. For K-uptake maximum values were obtained between pH 5.0 and 8.0. The decreased values between pH 5.0 and 4.0 were found to be due to a competition with H-ions. With a five-fold increased K-concentration, maximum uptake took place between pH 4.0 and 8.0.

In contrast with the results obtained by Olsen [45], van den Honert and Hooymans [18] found a clearly reduced uptake of nitrate by maize in the pH range from 5 to 8. Since the decrease was independent of the nitrate concentration in the medium, these authors deny the influence of HCO_3-ions and assume that the pH affects in some way the ion-carrier mechanism.

Mc Evoy [31] analyzed tobacco plants grown in sand culture at different levels of ammonium and sulphate supply. The nitrogen level of all media was kept constant by adding nitrate. Ammonium plants were found to be higher in nitrogen and phosphorus, slightly lower in potassium, but considerably lower in calcium and magnesium than nitrate plants. A high sulphate supply decreased the calcium and magnesium contents but did not affect the uptake of N, P and K. Almost similar results for Mg- and Ca-uptake were obtained by Bolle-Jones [5] in sand-culture experiments with *Hevea brasiliensis*. Laminae of nitrate plants were found to be considerably higher in Mg and Ca than those of ammonium plants. No effect of nitrogen compound on N-, P- and K-contents was observed by this author. With increasing amounts of added nitrate, magnesium content of the laminae was enhanced when the calcium content of the nutrient medium was low. At a high Ca-level Mg-content of the laminae was not affected by an increased nitrate concentration, but calcium content was slightly enhanced. Russell *et al.* [50] studied the effect of increasing amounts of applied ammonium nitrate on the minera

composition of brome grass grown under field conditions. K-, Mg- and P- but not Ca-content was increased by the N-dressings. An increased uptake of Mg- and K-ions by oat plants from ion-exchange resins when the amounts of added nitrate were increased, was observed by Welch *et al.* [67]. In the case of citrus and radish such a relationship was not observed.

Scharrer and Jung [52 53] carried out extensive sand-culture experiments with wheat, perennial rye grass and sunflower. Nitrogen was applied at different rates as nitrate and ammonium compounds, respectively. In additional series P, K, Na, Ca and Mg were varied. The plants were harvested in a green stage and analyzed for N, P, S, K, Na, Ca and Mg. In agreement with the results obtained by earlier workers a beneficial effect of nitrate on uptake of cations and of ammonium on uptake of anions was found to exist. These authors stress the constancy of the sum of absorbed cations at a constant nitrate supply and of the sum of absorbed anions at a constant NH_4-supply. An increased uptake of a certain cation resulting from an increased concentration of the latter in the external medium was found to bring about a reduced uptake of other cations; the same was true of anion uptake (see also Bear *et al.* [4] and van Itallie [21 22]). Of the cations, potassium takes a somewhat exceptional place as its uptake was not affected by an increased concentration of Na, Ca, or Mg in the external solution, whereas an increased concentration of potassium strongly reduced the uptake of the other cations.

Gouny [16] found considerably higher values for absorbed potassium, calcium and magnesium in maize and lupine plants dressed with nitrate than in ammonium plants. Nitrogen and phosphorus contents were lowest in the nitrate plants.

A beneficial effect of nitrogen fertilization on magnesium nutrition of apple trees growing under natural conditions has been observed by some authors [6], [17].

A potassium-magnesium antagonism has been observed by many authors [7 13 20 23 27 34 35 56 65 66]. An excess of potassium in the nutrient medium is apparently frequently the cause of the occurrence of magnesium deficiency under natural conditions. Ferrari and Sluijsmans [13] made the important observations that not only did a high concentration of K-ions in the soil depress Mg-uptake, but also that a higher concentration of magnesium within the plant was required to eliminate magnesium-deficiency symptoms when the internal concentration of the K-ions was at a high level. There is some indication that the potassium-magnesium antagonism is more important in trees than in crop plants [7 34 35 65]. In *Aspergillus niger* it does not occur [41 43].

EXPERIMENTAL METHODS

Wheat, oats, maize and potatoes were grown in field experiments on slightly acid sandy soils with different levels of added nitrogen in the form of calcium or sodium nitrate, ammonium nitrate and ammonium sulphate, respectively. The soils used for these experiments were moderately poor in available magnesium as determined by the *Aspergillus niger* technique.

Similar experiments with wheat and oats were conducted in glass jars of approximately 2.5 l capacity.

To compare the uptake of nitrogen and magnesium applied simultaneously to the same roots and to different roots, use was made of glass jars divided by a glass plate in two halves. One half of the pot was filled with a soil, moderately poor in magnesium, the other half with a sand-peat mixture free from magnesium. Nitrogen in the form of nitrate or of an ammonium compound was added to the soil or to the sand-peat mixture.

Magnesium was determined colorimetrically with titan yellow [51] and biologically with *Aspergillus niger* [36 37 41 61].

RESULTS

a) Pot experiments with different nitrogen compounds (cereals)

Wheat plants, *var.* van Hoek, were grown in glass jars containing approximately 2 kg of a sandy soil, moderately deficient in available magnesium, pH (H_2O) 5.2. Nitrogen in the form of ammonium sulphate, ammonium nitrate and sodium nitrate was applied in amounts of 175, 350, 700, 1400 and 2100 mg N per pot, respectively. Plants dressed with magnesium received 0.4 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ per pot.

The symptoms of magnesium deficiency appeared at a young stage. They were more pronounced in the plants dressed with ammonium sulphate than in those with ammonium nitrate. The higher the dose of ammonium compound applied, the heavier the symptoms of magnesium deficiency in the wheat plants (see Plates I–III). With sodium nitrate no symptoms of magnesium deficiency occurred. When magnesium sulphate had been applied, no magnesium-deficiency symptoms were observed in the plants dressed with sodium nitrate or ammonium nitrate, but pronounced symptoms occurred when ammonium sulphate was applied at the higher rates.

The yield data of this experiment were in agreement with the appearance of the wheat plants. The yields of the plants dressed with sodium nitrate were practically unaffected by the added magnesium in contrast with those of the plants dressed with ammonium sulphate or ammonium nitrate. When magnesium deficiency was eliminated, ammonium nitrate gave higher yields than sodium nitrate. The cause of this difference is unknown.

A similar experiment was carried out with oats. In this case Mitscherlich pots containing 7 kg of soil were used; nitrate was added as calcium and ammonium nitrate, respectively. The results

of the latter experiment are plotted in Fig. 1. They are in agreement with those of the preceding experiment.

The soil-pH values of the latter experiment determined at the end of the growing period of the oats, are recorded in Table I. It will be seen that a pronounced acidification had resulted from the treatment with ammonium salts. Although the increased concentration of

TABLE I

Effect of nitrogenous fertilizers on soil pH*						
	No added magnesium			1 g $MgSO_4.7H_2O$ per pot		
N, g per pot	$Ca(NO_3)_2$	NH_4NO_3	$(NH_4)_2SO_4$	$Ca(NO_3)_2$	NH_4NO_3	$(NH_4)_2SO_4$
0	4.6	4.6	4.6	4.7	4.7	4.7
0.35	4.7	4.6	4.1	4.6	4.5	4.0
1.05	4.9	4.5	3.7	4.9	4.4	3.9
2.10	5.0	4.3	4.1	5.1	4.3	3.8

* In this and all subsequent experiments of this paper, pH of the soil was measured in an aqueous suspension (1 : 5).

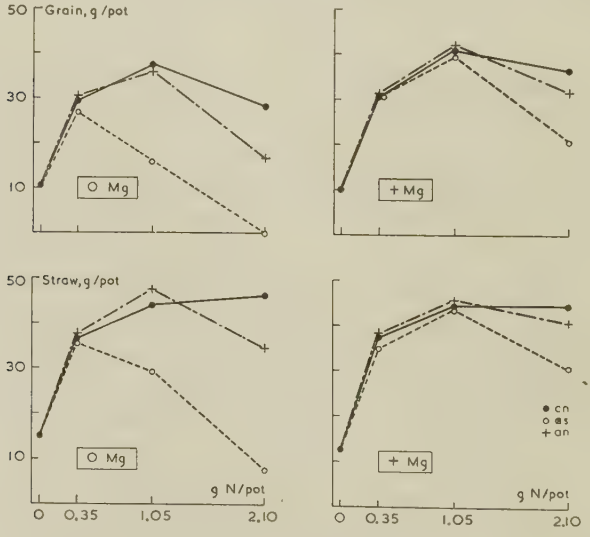


Fig. 1. Effect of different amounts of added nitrogen in the form of calcium nitrate (cn), ammonium nitrate (an), and ammonium sulphate (as) on the yield of oats, *var.* Marne, grown in Mitscherlich pots without added magnesium and in the presence of 1 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ per pot. Basal dressing: 1.5 g K_2SO_4, 1.5 g $Ca(H_2PO_4)_2$ and 0.15 g $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ per pot.

A

B

Plate I. Effect of different amounts of added nitrogen on the growth of spring wheat. From left to right: 0, 175, 350, 700, 1400 and 2100 mg N per pot. *No magnesium added.* A: N in the form of ammonium sulphate, B: N in the form of sodium nitrate.

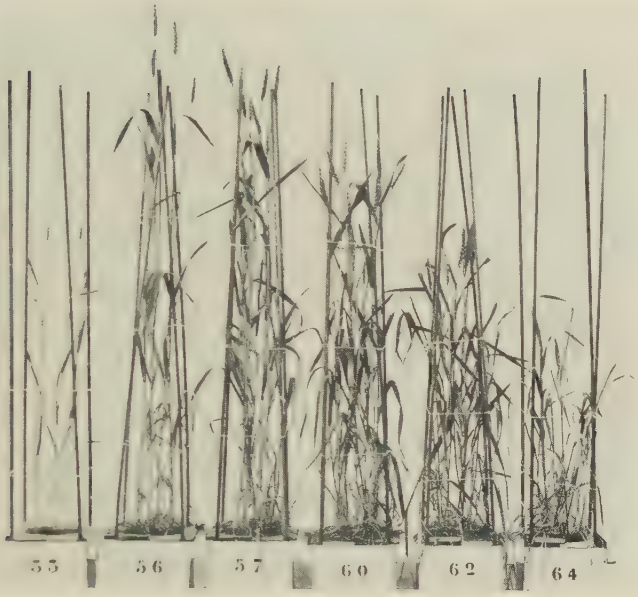


Plate II. Effect of different amounts of added nitrogen on the growth of spring wheat. From left to right : 0, 175, 350, 700, 1400 and 2100 mg N per pot. *0.4 g $MgSO_4.7H_2O$ added per pot.* A : N in the form of ammonium sulphate, B : N in the form of sodium nitrate.

Plate III. Effect of different amounts of added nitrogen on the growth of spring wheat. From left to right : 0, 175, 350, 700, 1400 and 2100 mg N per pot. N in the form of ammonium nitrate. A : no magnesium added, B : 0.4 g $MgSO_4.7H_2O$ per pot.

H-ions in the soil has undoubtedly contributed to the occurrence of magnesium deficiency in the oat plants dressed with ammonium salts, the antagonizing effect of the NH_4-ions has presumably also played an important role in the reduced uptake of Mg-ions. In contrast to the latter, NO_3-ions exert a highly stimulatory effect on uptake of magnesium ions by higher plants. This is shown in the experiment of section *b*.

b) *Pot experiment with divided root systems* (*cereals*)

In order to demonstrate the beneficial effect of nitrate on magnesium uptake by wheat plants, the following pot experiment was carried out. Glass cylinders of 2.4 l capacity were divided by a vertical glass plate in two halves. One half of each pot was filled with a sandy soil of pH 5.1, the other half with a mixture of 9 parts quartz sand and 1 part peat, pH 6.3. The latter materials had been purified from magnesium by washing with sulphuric acid and glass-distilled water. The soil contained approximately 50 μg magnesium per 3 g of air-dried soil as determined by the *Aspergillus niger* method. This amount is too low when ammonium sulphate is used as the nitrogen source but may be sufficient for normal plant growth when nitrate is supplied.

The basal nutrients, 0.5 g K_2SO_4, 0.5 g $Ca(H_2PO_4)_2$ and 50 mg of $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, were evenly distributed in both halves.

Nitrogen in the form of ammonium sulphate, ammonium lactate and calcium nitrate, respectively, was mixed either with the soil or with the sand-peat mixture. Magnesium sulphate, if supplied, was only given to the soil half of the pot. Six wheat seedlings were planted on top of the glass plate in such a way, that some of their roots grew into the soil and the others into the sand-peat mixture. This allowed a comparison to be made of the absorption of nitrogen (applied as ammonium or nitrate) and magnesium, when these elements were fed together to the roots or separately to different roots.

Symptoms of magnesium deficiency in the wheat plants became vizible shortly after the emergence of the second leaves. In the absence of added magnesium, healthy plants were found only in those pots where nitrate had been added to the soil half. When it had been given to the sand-peat mixture, which was completely free from magnesium, pronounced symptoms of magnesium deficiency

occurred. The small amount of available magnesium present in the soil half of the pots, was apparently absorbed by the wheat roots only in those cases in which nitrate ions were absorbed simultaneously by the same roots. Plants supplied with ammonium lactate or ammonium sulphate showed pronounced symptoms of magnesium deficiency. Initially there was no difference between ammonium nitrogen supplied to the soil and to the sand. In the course of the growing period, however, the plants which had received ammonium lactate in the soil half improved their growth considerably. Presumably this was due to nitrate formation by nitrifying bacteria. In the case of ammonium sulphate, nitrate formation apparently did not occur, due to the more pronounced acidification of the soil.

Plants supplied with magnesium sulphate showed no symptoms of magnesium deficiency, and as with the plants growing without added magnesium, the best growth was obtained when nitrate and magnesium had been added to the same half pot.

The yield data of this experiment are given in Table II. They clearly show that nitrate exerted its beneficial effect only when it was given to the soil half of the pots which contained a small amount of available magnesium. When it was added to the sand-peat

TABLE II

Effect of different nitrogen compounds on yield of wheat plants grown with part of their roots in a magnesium-free sand-peat mixture and with the other part in a soil, moderately deficient in magnesium

N-compound applied	Half of the pot to which the N was added	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ added to the soil half, g	Yield *, g per pot		pH of soil after harvest	
			Grain	Straw	Soil half	Sand-peat half
$Ca(NO_3)_2$	soil	0	12.0	20.2	5.1	6.2
,,	sand-peat	0	4.0	13.1	4.8	6.7
NH_4-lactate	soil	0	8.1	16.9	4.9	6.1
,,	sand-peat	0	3.4	11.4	5.1	6.1
$(NH_4)_2SO_4$	soil	0	5.0	11.8	4.0	5.9
,,	sand-peat	0	4.6	12.3	4.6	5.1
$Ca(NO_3)_2$	soil	0.5	13.7	21.5	5.1	6.1
,,	sand-peat	0.5	10.4	17.9	4.6	6.5
NH_4-lactate	soil	0.5	11.6	17.8	4.6	6.1
,,	sand-peat	0.5	8.9	15.2	4.5	6.1
$(NH_4)_2SO_4$	soil	0.5	7.6	11.5	4.0	6.2
,,	sand-peat	0.5	8.7	13.5	4.5	5.2

* Averages of duplicate values.

mixture which was free from magnesium the yields were low, due to magnesium deficiency.

That the beneficial effect of nitrate on the magnesium uptake of the wheat plants was due to the NO_3-ions as such and not to the slightly reduced soil acidity may be concluded from the fact that magnesium was taken up from the soil at pH 4.9 in the presence of ammonium lactate more easily than at pH 5.1 in the absence of added nitrogen. In the former case NO_3-ions derived by nitrification from NH_4-lactate presumably were present in the soil.

To provide more evidence that the beneficial influence of nitrate on the magnesium supply was due to the NO_3-ions as such, a similar experiment was carried out in which an amount of $CaCO_3$, equivalent to that of the $Ca(NO_3)_2$ used, was added to the soil half of some of the pots. The pH values of the soil and the sand-peat mixture were 5.3 and 5.2 respectively.

The results of this experiment were in agreement with those of the preceding one: healthy plants when calcium nitrate was added to the soil half of the pot, magnesium-deficient plants when it was added to the sand-peat mixture. In the latter case it was of minor importance whether or not calcium carbonate had been mixed through the soil half.

c) Field experiments with cereal crops

The interaction between magnesium and nitrogenous compounds as observed in the pot experiments of sections *a* and *b* was also studied in field experiments with wheat, oats and maize. The moderately acid sandy soils used in these experiments were low in available magnesium as determined by the *Aspergillus niger* method.

Experiment 662

This experiment was started in 1942 on a sandy soil containing 6% organic matter, pH(H_2O): 5.3; it was continued until 1949. Nitrogen was added in different amounts in the form of ammonium sulphate, calcium nitrate and ammonium nitrate limestone, respectively. A number of plots were dressed with magnesium sulphate every year, the others remained without a magnesium dressing. Those plots dressed with ammonium sulphate in one year, received nitrate in the next. Ammonium nitrate limestone only was applied every year to one series of plots.

1942, spring wheat. Nitrogen was applied in amounts of 30, 60, 90, 120 and 150 kg N per ha in the form of ammonium sulphate, ammonium nitrate limestone and calcium nitrate, respectively. As a basal dressing 80 kg P_2O_5 as $CaHPO_4$, 120 kg K_2O as KCl and 100 kg $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$ per ha were applied.

In agreement with the results of the pot experiment described in section *a*, no symptoms of magnesium deficiency in the wheat plants were observed when calcium nitrate had been used as the nitrogenous fertilizer. With ammonium nitrate limestone slight symptoms occurred at a young stage particularly at the highest nitrogen rates. The most pronounced deficiency symptoms were obtained with ammonium sulphate, however.

The yield data of this experiment are plotted in Fig. 2.

They clearly show the great effect of the nitrogen compounds on the response of the wheat plants to the magnesium dressing.

1943, winter wheat. In 1943 the experiment was continued with winter wheat. In contrast to the spring wheat of 1942, the winter wheat in 1943 hardly responded to the added magnesium. It is uncertain whether this was due to different climatic conditions in the two years or to varietal differences in magnesium requirement or magnesium uptake.

1945, spring wheat. In 1945, spring wheat was again grown on this field. Ammonium sulphate was applied to the calcium-nitrate plots of 1944 and calcium nitrate to the ammonium-sulphate plots. As will be seen from the yield data of Fig. 2 there was a great difference in response to added magnesium between the plots which had been dressed for 4 years with ammonium nitrate limestone on the one hand and those with alternately calcium nitrate and ammonium sulphate on the other. The plots dressed with ammonium nitrate limestone gave considerably higher yields in the absence of added magnesium than those with ammonium sulphate and calcium nitrate. Apparently this was due to the fact that in the former the level of available magnesium was maintained more satisfactorily than with nitrate and ammonium sulphate *. In the years with a nitrate dressing the removal of magnesium by the crop was favoured while in the years with ammonium sulphate a decrease of soil pH

* For the figures of available magnesium see the paper by Mulder and Hussain Aleem [43].

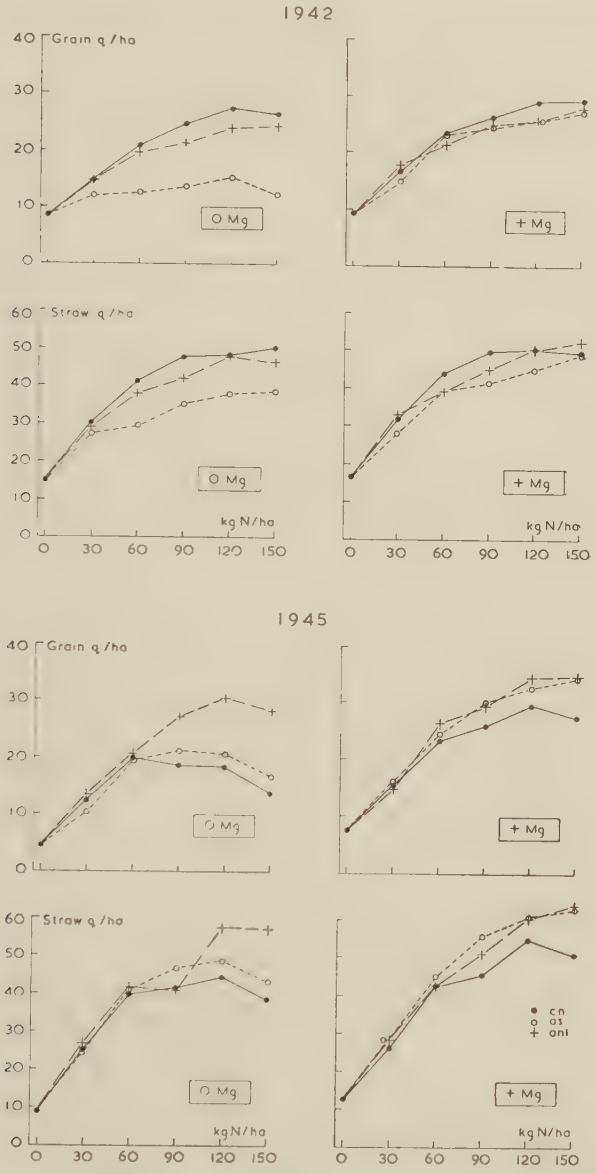


Fig. 2. Field experiment 662. Effect of different amounts of fertilizer nitrogen in the form of calcium nitrate (cn), ammonium sulphate (as), and ammonium nitrate limestone (anl) on the yield of spring wheat, *var.* van Hoek, grown without added magnesium and in the presence of 400 kg of $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ per ha, respectively.

resulted in the leaching of magnesium by the autumn and winter rains (see Table III for the pH values).

Similar results to those of Experiment 662 have been obtained in a number of other field trials with oats and maize. The latter are recorded in section *e.* (Experiments 1312 and 1325, 1953).

d) Field experiments with potatoes

The results of a number of field experiments with potatoes have been plotted in Figures 3 and 4. In experiment 662, which was continued from 1942 to 1949, potatoes were grown in 1944, '46, '47, '48 and '49. Nitrogen in the form of calcium nitrate, ammonium nitrate limestone and ammonium sulphate, respectively, was applied at the rate of 50, 100, 200 and 300 kg of N per ha. Equal amounts were applied on the same plots every year. The ammonium nitrate limestone was applied each year to the same plots but calcium-nitrate and ammonium-sulphate dressings were interchanged on the other plots every year. The latter procedure effected a greater loss of soil magnesium than the manuring with ammonium nitrate limestone (a higher removal of Mg by the crop in the years with nitrate dressing and a more pronounced acidification followed by an increased leaching by the rains during the autumn and winter in a year with ammonium-sulphate application). Yet ammonium sulphate gave consistently lower yields than nitrate, apparently due to the antagonizing effect of ammonium ions and the beneficial effect of NO_3-ions on magnesium uptake (see Fig. 3). The pH values of the soil of this experiment have been recorded in Table III.

TABLE III

Effect of nitrogenous fertilizers on the pH(H_2O) of the soil * (Exp. 662)

Kg N per ha †	1942			1943			1944			1945			1947			1948		
	cn§	as§	anl§	as	cn	anl	cn	as	anl	as	cn	anl	as	cn	anl	cn	as	anl
0	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.0	5.0	5.0	5.3	5.3	5.3
50 (30)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.4	5.3	5.2	5.1	5.2	5.2	5.1	5.2	4.8	4.9	5.0	5.2	5.1	5.3
100 (60)	5.2	5.1	5.2	5.1	5.2	5.2	5.1	4.9	5.1	5.1	5.0	5.1	4.6	4.8	4.9	5.3	5.1	5.2
150 (90)	5.3	5.1	5.3	5.1	5.2	5.3	5.2	4.8	5.2	5.1	5.0	5.2	4.6	4.8	5.0	5.2	5.0	5.3
200 (120)	5.2	5.0	5.2	5.0	5,3	5.3	5.1	4.7	5.2	5.0	4.9	5.2	4.4	4.7	5.0	5.2	4.8	5.3
300 (150)	5.3	4.9	5.2	4.9	5.2	5.2	5.2	4.6	5.1	5.0	4.9	5.1	4.3	4.5	4.8	5.0	4.8	5.3

* Measured by quinhydrone electrode; average values of 0 Mg and + Mg plots.

† N-rates supplied to potatoes; in parentheses: N-rates of cereals. Potatoes grown in 1944, '46, '47, '48 and '49, wheat in 1942, '43 and '45.

§ cn = calcium nitrate, as = ammonium sulphate, anl = ammonium nitrate limestone. The cn- and as-dressings interchanged each year, those with anl were applied each year on the same plot.

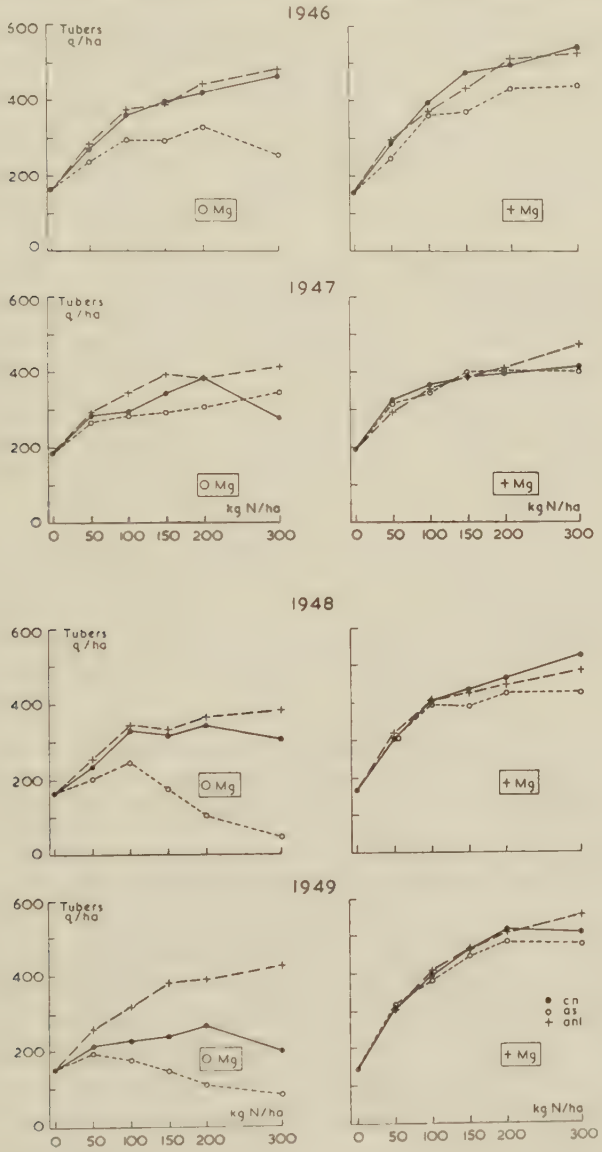


Fig. 3. Field experiment 662 (potatoes, *var.* Voran). Effect of different amounts of fertilizer nitrogen in the form of calcium nitrate (cn), ammonium sulphate (as), and ammonium nitrate limestone (anl) on the yield of potatoes grown without added magnesium and in the presence of 200 kg of $MgSO_4 \cdot H_2O$ per ha, respectively. All plots received a basal dressing of 100 kg P_2O_5 per ha as double superphosphate, and 300 kg K_2O per ha as K_2SO_4.

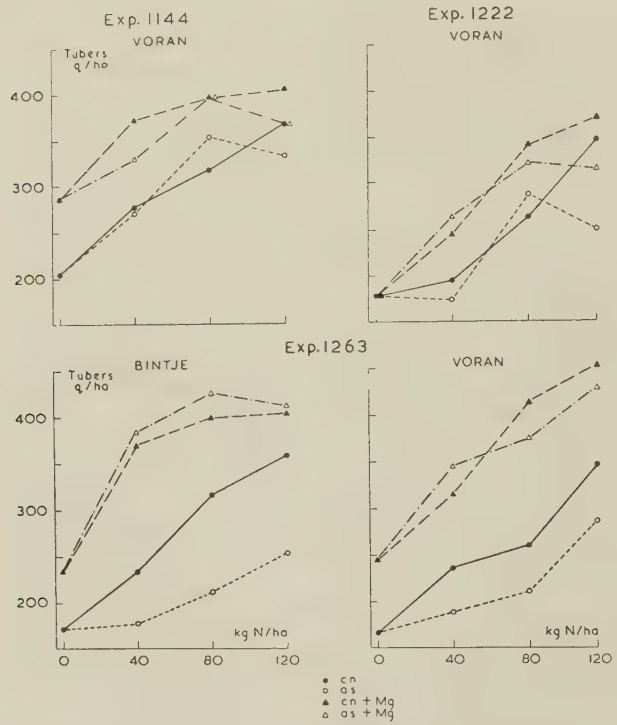


Fig. 4. Effect of different amounts of fertilizer nitrogen in the form of calcium nitrate (cn) and ammonium sulphate (as) on the yield of potatoes grown without added magnesium and in the presence of 150 kg $MgSO_4 \cdot H_2O$ per ha, respectively.

These experiments were laid out on sandy soils, adequately supplied with P and K (100 kg P_2O_5 per ha in the form of superphosphate, and 200 kg K_2O per ha as K_2SO_4). Exp. 1144: soil pH 5.1, organic matter 4.8%; Exp. 1222: pH 4.7, organic matter 7.1%; Exp. 1263: pH 5.0, organic matter 4.2%.

The results of a few further field experiments with potatoes are plotted in Fig. 4. These results demonstrate the favourable effect of nitrate on magnesium uptake by the potato plants; they are in agreement with those of the pot experiments with wheat plants which had divided root systems (see section *b*). In the presence of added magnesium the nitrate-yield curves have their steepest rise between 0 and 80 kg N (Exp. 1222) or between 0 and 40 kg (Experiments 1144 and 1263 *var.* Bintje). With greater amounts of added nitrogen the curves flatten, indicating that the N-supply is approaching its optimum. In the absence of added magnesium, however, the nitrate-yield curves continue to rise steeply up to the highest N-level. Since it may be assumed that the N-supply to magnesium-

deficient and magnesium-dressed plants at the same nitrogen level is equal, it must be concluded that the rise in yield between 80 and 120 kg nitrate-N (Exp. 1222) and between 40 and 120 kg nitrate-N (Experiments 1144 and 1263 *var.* Bintje) in the absence of added magnesium is mainly due to the "magnesium effect" of $Ca(NO_3)_2$, *i.e.* to the improved magnesium uptake due to the presence of NO_3-ions.

The effect of nitrate on magnesium uptake by potato plants is of general importance in growing potatoes on slightly acid sandy and peaty soils in the Netherlands. Frequently pronounced symptoms of magnesium deficiency occur when the nitrogen supply is low. Application of magnesium sulphate without improving the nitrogen supply often does not eliminate the magnesium-deficiency symptoms. An ample dressing of nitrate, however, often enables the plants to take up, even from soils relatively poor in available magnesium, adequate amounts of magnesium for a normal development. Ammonium nitrate limestone which is commonly used by the farmers as the nitrogenous fertilizer gives results comparable to those of calcium nitrate, due to its nitrate content and the nitrification of part of the ammonia. Magnesium deficiency symptoms *, magnesium content of the foliage, and yield of tubers may be used to demonstrate the effect of nitrate on magnesium uptake. Fig. 5 gives the results of a number of field experiments using increasing amounts of ammonium nitrate limestone, in the presence or absence of added magnesium sulphate. It will be seen that foliar symptoms of magnesium deficiency occurred in the presence of 80 kg of added MgO per ha when the nitrogen manuring was low. On the other hand, healthy plants were mostly obtained at the rate of 140 kg N per ha in the absence of added magnesium. The magnesium content of the foliage (Fig. 6) and the yield of tubers (Fig. 5) responded in a similar way to the nitrogen manuring.

e) Direct effect and after-effect of N-compounds on the magnesium supply of plants

In order to compare the direct effect (mainly caused by the kind of N supplied) and after-effect (mainly caused by change of soil pH) of a single manuring with ammonium sulphate or calcium nitrate,

* Foliar symptoms of magnesium deficiency have been evaluated by K. Boskma in the middle of July.

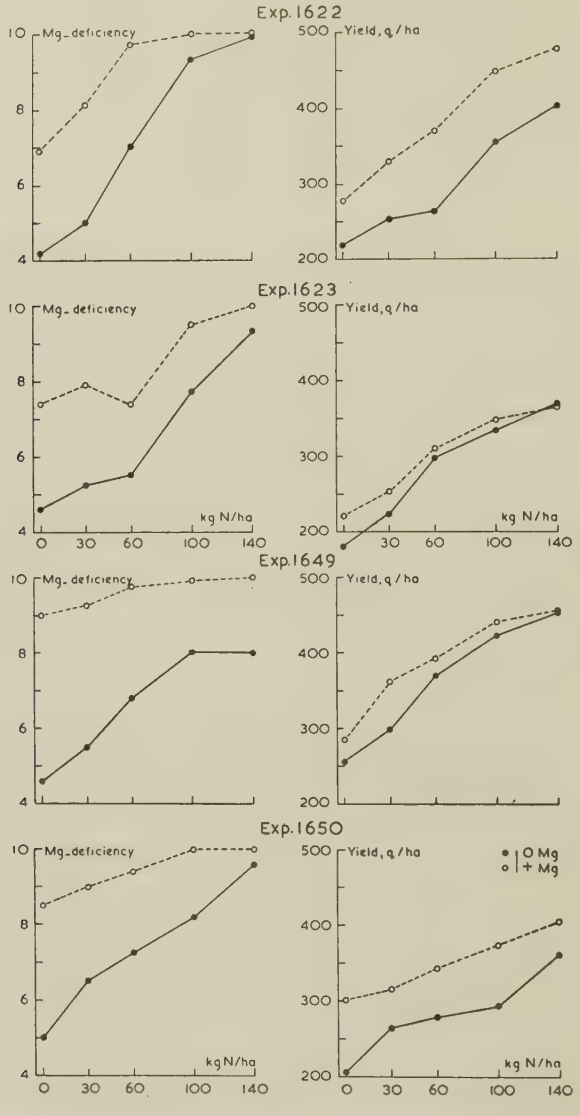


Fig. 5. Effect of increasing amounts of added ammonium nitrate limestone on magnesium-deficiency symptoms in the foliage (left) and on the yield (right) of potatoes, *var.* Voran, grown in the absence of added magnesium and in the presence of 300 kg $MgSO_4 \cdot H_2O$ per ha. 4 = pronounced symptoms of Mg-deficiency, 10 = healthy plants.

Soil pH: 5.4 (Exp. 1622), 5.6 (Exp. 1649), and 4.9 (Exp. 1650). Soil organic matter (%): 4.0 (Exp. 1622), 4.8 (Exp. 1649), and 12.0 (Exp. 1650). A basal dressing of 120 kg P_2O_5 per ha as double superphosphate and 160–200 kg K_2O per ha as K_2SO_4 was applied.

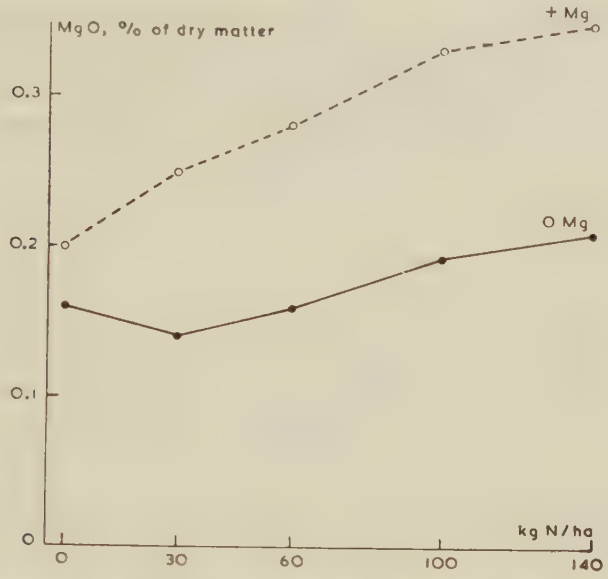


Fig. 6. Effect of different amounts of nitrogen as ammonium nitrate limestone on magnesium content of the foliage of potatoes, *var.* Voran (average samples of stems and leaves). Exp. 1622 (see Fig. 5). + Mg = 80 kg MgO per ha as $MgSO_4 \cdot H_2O$.

on magnesium nutrition of crop plants, experiments 1312 and 1325 were started in 1952. These experiments were carried out on acid sandy soils (organic matter 4.0 and 4.2% and pH, H_2O, 5.0 and 4.8, respectively).

The design of these experiments was as follows. One set of plots (A) received each year 1952–1955 nitrogen in the form of calcium nitrate or ammonium sulphate. The different plots of the series received different levels of N-supply each year. A second set (B) received similar dressings once in two years (1952, 1954), and a third (C) once in three years (1953). In the years that no calcium nitrate or ammonium sulphate was supplied, a uniform dressing of ammonium nitrate was given to all plots, except to the nil-nitrogen plots. Magnesium, if supplied, was applied only in those years when ammonium sulphate and calcium nitrate were given. In the autumn of the second year calcium carbonate free from magnesium was supplied to the ammonium-sulphate plots at the rate of 1 kg $CaCO_3$ per kg of total amount of $(NH_4)_2SO_4$ applied in 1952 and 1953. Potatoes were grown in 1952 and 1955 maize in 1953, and oats in

1954. All plots received every year a basal dressing of 100 kg P_2O_5 per ha (to cereals) or 120 kg P_2O_5 per ha (to potatoes) as double superphosphate, and 120 kg K_2O per ha as KCl (to cereals) or 250 kg K_2O per ha as K_2SO_4 (to potatoes). The results of these experiments

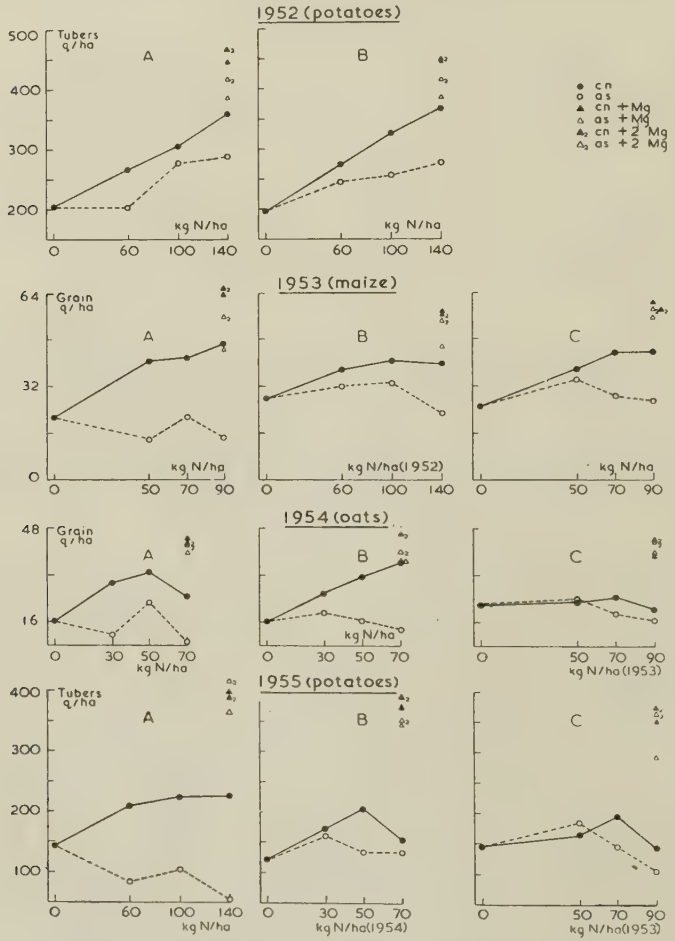


Fig. 7. Experiment 1312. Effect of different amounts of nitrogen in the form of ammonium sulphate (as) and calcium nitrate (cn) on the yield of potatoes (*var.* Voran), maize (*var.* Goudster), and oats (*var.* Zege). *A*: dressed every year, *B*: dressed in 1952 and 1954, and *C*: dressed in 1953 only, with as, cn and Mg according to plan.

In the years when no calcium nitrate and ammonium sulphate were supplied the B and C plots, except the nil-N plots, were dressed uniformly with ammonium nitrate (70 kg N per ha in the case of cereals and 140 kg N per ha on potatoes. Magnesium, when supplied, was given to the plots with the highest N-rate in amounts of 40 (Mg) and 80 (2 Mg) kg MgO per ha in the form of $MgSO_4.H_2O$.

are plotted in Figures 7 and 8. They are in general agreement with those of the experiments described in sections *a* and *b*, viz. a considerably more pronounced response to magnesium on the plots dressed with $(NH_4)_2SO_4$ than on those dressed with $Ca(NO_3)_2$. The pH values are given in Table IV.

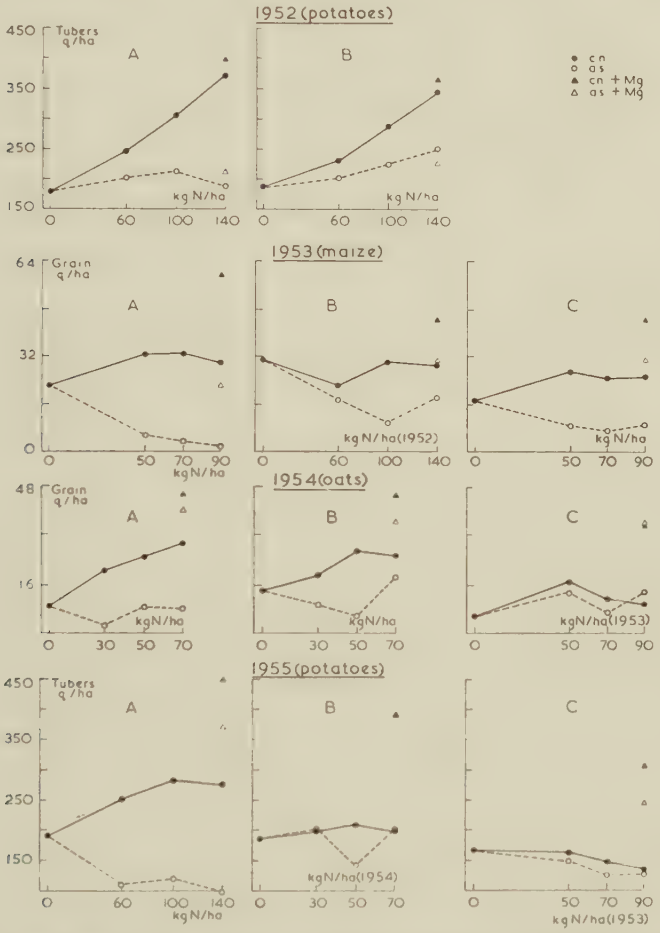


Fig. 8. Experiment 1325. Effect of different amounts of nitrogen in the form of ammonium sulphate (as) and calcium nitrate (cn) on the yield of potatoes (*var.* Voran), maize (*var.* Goudster), and oats (*var.* Zege). *A*: dressed every year, *B*: dressed in 1952 and 1954, and *C*: dressed in 1953 only, with as, cn and Mg according to plan.

In the years when no calcium nitrate and ammonium sulphate were supplied the B and C plots, except the nil-N plots, were dressed uniformly with ammonium nitrate (70 kg N per ha in the case of cereals, and 140 kg N per ha on potatoes). Magnesium, when supplied, was given to the plots with the highest N-rate in an amount of 40 kg MgO per ha in the form of $MgSO_4.H_2O$.

TABLE IV

Direct effect, after-effect and cumulative effect of calcium nitrate and ammonium sulphate on pH (H_2O) of the soil * (Experiments 1312 and 1325)

Exp., year and crop	A Cn and as in 1952, '53, '54, '55			B Cn and as in 1952, '54			C Cn and as in 1953		
	kg N per ha	cn	as	kg N per ha	cn	as	kg N per ha	cn	as
1312, 1952 potatoes	0	4.9	4.9	0	4.9	4.9	0	—	—
	60	5.0	4.6	60	4.9	4.7	140 †	—	—
	100	5.0	4.7	100	5.0	4.7	140 †	—	—
	140	5.0	4.6	140	5.0	4.7	140 †	—	—
1312, 1953 maize	0	4.8	4.8	0	5.0	5.0	0	4.8	4.8
	50	4.9	4.5	70 †	4.9	4.8	50	4.8	4.7
	70	4.9	4.6	70 †	4.8	4.7	70	5.0	4.6
	90	4.9	4.4	70 †	4.8	4.8	90	4.8	4.5
1312, 1954 § oats	0	4.8	4.8	0	4.8	4.8	0	4.8	4.8
	30	5.0	4.7	30	4.9	4.8	70 †	4.8	4.8
	50	5.0	4.8	50	4.9	4.8	70 †	4.9	4.7
	70	5.0	4.8	70	4.8	4.7	70 †	4.7	4.7
1312, 1955 potatoes	0	4.7	4.7	0	4.8	4.8	0	4.6	4.6
	60	4.8	4.5	140 †	4,7	4,6	140 †	4.6	4.6
	100	4.8	4.7	140 †	4.7	4.6	140 †	4.6	4.6
	140	4.8	4.5	140 †	4.6	4.7	140 †	4.6	4.6
1325, 1952 potatoes	0	4.7	4.7	0	4.9	4.9	0	—	—
	60	4.7	4.5	60	4.7	4.5	140 †	—	—
	100	4.8	4.4	100	4.7	4.4	140 †	—	—
	140	4.9	4.4	140	4.8	4.4	140 †	—	—
1325, 1953 maize	0	4.8	4.8	0	4.9	4.9	0	4.8	4.8
	50	4.7	4.4	70 †	4.7	4.7	50	4.7	4.5
	70	4.8	4.4	70 †	4.7	4.6	70	4.7	4.4
	90	4.8	4.4	70 †	4.7	4.6	90	4.6	4.4
1325, 1954 § oats	0	5.0	5.0	0	4.9	4.9	0	4.9	4.9
	30	5.0	5.0	30	4.9	4.9	70 †	4.9	4.8
	50	5.0	4.9	50	5.0	4.9	70 †	4.9	4.8
	70	5.1	5.1	70	5.0	4.9	70 †	4.8	4.9
1325, 1955 potatoes	0	4.6	4.6	0	4.7	4.7	0	4.6	4.6
	60	4.7	4.6	140 †	4.7	4.7	140 †	4.5	4.5
	100	4.7	4.6	140 †	4.6	4.7	140 †	4.5	4.6
	140	4.7	4.6	140 †	4.7	4.7	140 †	4.5	4.6

* Samples taken in the autumn; pH measured by quinhydrone electrode.

§ $CaCO_3$, practically free from magnesium, at the rate of 1 kg $CaCO_3$ per 1 kg $(NH_4)_2SO_4$, applied in 1952 and 1953, was given to the as-plots in December 1953.

† N in the form of NH_4NO_3.

In 1953 a comparison could be made between direct effect of ammonium sulphate and calcium nitrate (C plots), after-effect (B plots) and cumulative effect (A plots). Although the nitrogen rates in 1952 had been higher than those in 1953, owing to the higher N-requirement of potatoes than that of maize, the after-effect of an ammonium dressing (B plots) on magnesium supply of the maize plants was slightly less harmful than the direct effect of this N-compound (C plots). This was particularly true of Experiment 1325. When ammonium sulphate had been applied in two successive years (1952, 1953) practically no yield of maize was obtained in 1953. A dressing of 80 kg MgO per ha as magnesium sulphate gave a considerably improved plant growth, but the yields were still much lower than with calcium nitrate plus magnesium. In 1954 and '55 practically normal yields were obtained on the A-pots in the presence of added magnesium, demonstrating that the total failure of the oat crop in 1954 and the potato crop in 1955 in the absence of added magnesium was a result of an inadequate magnesium supply of the plants.

The harmful after-effect of a manuring with ammonium sulphate on the magnesium nutrition of a subsequent crop is presumably mainly due to an increased leaching of magnesium by the autumn and winter rains when the acidity of the soil is increased. In addition the high acidity may have an unfavourable effect on the uptake of magnesium ions by the plant roots.

The relationships 1) between Mg-supply to cereal plants and the pH of the nutrient medium in culture solution, and in sand respectively, 2) between Mg-supply to plants and the soil pH, and 3) between the soil pH and the available magnesium as determined by the *Aspergillus niger* technique, were studied in a previous paper [61]. An abstract of the main results of that paper will be given in the following pages.

1a. Plants growing in culture solutions

Oat plants were grown in nutrient solutions containing a range of amounts of added magnesium at pH 4.0–4.5 and pH 6.0–6.5, respectively. In the acid medium inadequate amounts of magnesium were found to give a somewhat greater depression of yield than in the sub-neutral medium.

This was presumably because the root systems of the plants in the acid medium, particularly at low magnesium levels, were initially considerably smaller than those of plants growing in the neutral medium. At a later stage these

root systems more or less recovered. In order to see whether the uptake and assimilation of magnesium were affected by the pH of the nutrient medium, a small amount of magnesium sulphate was added to some of the magnesium-deficient cultures when the plants were two months old. The response to the added magnesium was found to be practically unaffected by the pH of the nutrient medium (see Table V).

TABLE V

Effect of magnesium supply and pH of culture solution on the yield *, g dry matter per pot, of oat plants

mg Mg per culture	pH 4.0—4.5		pH 6.0—6.5	
	Grain	Straw	Grain	Straw
0	0	0.15	0	0.40
0 + 1 †	0	0.29	0	1.90
0.26	0	0.47	0	2.58
0.26 + 2 †	0	3.24	0	3.14
1.35	0	3.50	0	5.40
1.35 + 3 †	1.22	5.73	0	8.24
105	6.66	9.80	8.17	12.07

* Averages of duplicate values. † Added after 2 month's growth.

1b. Oat plants growing in sand-peat mixtures

Both the sand and the peat had been purified from magnesium. $CaCO_3$, free from magnesium, was applied in amounts of 0, 1, 2, 3 and 5 g per jar containing 2 kg of sand-peat mixture (10 sand : 1 peat). Magnesium was applied in amounts of 0, 5, 10 and 50 mg Mg, respectively, in the form of $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. Only the 0- and 10-mg series were supplied with the highest dose of $CaCO_3$.

At pH values of 3.5 and 4.2 no normal growth of the oat plants in the sand-peat medium took place; the response to added magnesium was slight at these pH values (see Table VI). At pH values of 4.6, 5.6 and 6.8 a pronounced response to added magnesium was found to occur. When a comparison is made between the yield data at pH 4.6 and those at pH 5.6, it will be seen that the response to magnesium was approximately equal in both cases.

TABLE VI

Effect of magnesium supply and pH of the medium on the yield *, g dry matter per pot, of oat plants grown in sand-peat mixtures

mg Mg per pot	$CaCO_3$, g per pot									
	0 (3.5) †		1 (4.2)		2 (4.6)		3 (5.6)		5 (6.8)	
	grain	straw	grain	straw	grain	straw	grain	straw	grain	straw
0	0	0.08	0	1.07	0	8.51	0.70	10.06	0.75	11.59
5	0	0.17	0	2.00	6.07	12.42	8.58	15.83	—	—
10	0	0.12	0	2.51	8.13	12.26	11.57	16.06	13.14	17.10
50	0	0.12	0	3.74	12.87	14.12	17.73	15.46	—	—

* Averages of duplicate values.

† In parentheses: pH values, average values of 0- and 10-mg Mg series.

2. Plants growing in soil

Oat plants were grown in acid magnesium-deficient sandy soils with and without added $CaCO_3$. The effect of added $MgSO_4$ was investigated on the acid soils and on $CaCO_3$-treated soils.

Although the response of the oat plants to magnesium (in the absence of added $CaCO_3$) was considerably more pronounced than that to $CaCO_3$ (in the absence of added magnesium), the latter treatment gave a clearly improved plant growth (see Table VII). Since available magnesium, as determined by the *Aspergillus niger* technique, was found to be not affected by the liming of the acid soils, it must be concluded that the reduced acidity of the soil had to some extent favoured the uptake of the small amount of available magnesium present in the acid soils. This may have been due both to a better developed root system and to an improved uptake of Mg-ions under less acid conditions. An increased nitrification and a stimulation of magnesium uptake by the nitrate (see section *b*) may also have played a part.

TABLE VII

Effect of $MgSO_4$ and $CaCO_3$ on the yield, g dry matter per pot, of oats grown in acid sandy soils

Soil *	pH (H_2O)	Grain	Straw
Z, control	4.1	0	2.66
Z, + $MgSO_4$ †	—	5.88	5.55
Z, + $CaCO_3$ †	—	3.42	5.41
Z, + $MgSO_4$ + $CaCO_3$	—	6.88	6.00
R, control	4.6	0.88	5.28
R, + $MgSO_4$	—	10.08	9.00
R, + $CaCO_3$	—	4.75	7.31
A, control	5.4	5.14	5.43
A, + $MgSO_4$	—	7.32	6.72
A, + $CaCO_3$	—	6.53	6.38
A, + $MgSO_4$ + $CaCO_3$	—	7.57	6.40
W, control	4.8	0	0.93
W, + $MgSO_4$	4.7	9.27	9.10
W, + $CaCO_3$	7.1	0.85	6.65
W, + $MgSO_4$ + $CaCO_3$	6.9	11.24	11.40

* Glass jars containing 0.5 (Z), 1 (R) and A) and 1.75 (W) kg of soil were used.

† $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ and $CaCO_3$, were applied in amounts of 0.75 and 2.0 g per kg of soil. In the case of soil W these amounts were 0.57 and 2.9 g.

3. Soil pH and plant-available magnesium

To study the relationship between soil pH, available magnesium in the soil and the degree of magnesium deficiency of cereal crops, the following experiments have been carried out. Soil samples were taken from different areas of magnesium-deficient fields, viz. from areas with severely magnesium-deficient plants, with moderately magnesium-deficient plants and with healthy plants, respectively. The appearance of the cereal plants, the content of available soil magnesium and the pH of the soil were determined. As will be

seen from Table VIII a close correlation was found to exist between the soil pH, the content of available magnesium and the appearance of the crop.

TABLE VIII

Relationship between soil pH, available magnesium (*Aspergillus niger*) and status of oat crop

Soil	pH (H_2O) *	Status of the crop †	Available Mg, μg per 3 g of air-dried soil	Soil	pH (H_2O)	Status of the crop	Available Mg, μg per 3 g of air-dried soil
Z	4.1	D	<25	B	4.2	D	25
Z	4.6	SD	<25	B	4.3	SD	75
Z	5.5	H	200	B	4.7	H	150—200
E	4.2	D	25	V	4.4	D	25—50
E	4.5	SD	25	V	4.4	SD	100
E	5.8	H	75—100	V	5.0	H	150—200
K	4.5	D	25	Vd	5.0	D	<50
K	4.8	SD	25—50	Vd	5.7	SD	<50
K	5.2	H	150	Vd	5.2	H	<50
A	5.2	D	50	Vn	5.0	D	<25
A	5.6	SD	100	Vn	5.7	SD	50—100
A	5.8	H	150—200	Vn	6.1	H	150
R	4.6	D	25—50	T	5.2	D	50
R	4.8	SD	25—50	T	5.3	SD	100
R	4.9	H	100	T	5.1	H	100
L	4.4	D	50—100	He	5.2	D	25
L	4.8	SD	100	He	5.3	SD	50—75
L	4.8	H	200	He	4.7	H	75—100
O	4.4	D	25	Ha	4.2	D	<50
O	4.8	SD	50	Ha	4.3	SD	<50
O	4.9	H	100	Ha	4.7	H	75—100

* Measured by glass electrode.

† D = severely deficient, SD = slightly deficient, H = healthy plants.

The harmful effect of a low pH on the content of available soil magnesium was found to be due to an increased loss of magnesium by leaching. This was demonstrated by incubating for $2\frac{1}{2}$ months a number of samples of a fertile sandy soil (approximately 20% organic matter) after acidification with increasing amounts of sulphuric acid to pH values of 4.1, 3.9, 3.6, 2.8 and 2.2, respectively. No decrease of available soil magnesium during this period was observed. When, however, the samples were leached with distilled water, until no further SO_4-ions occurred in the filtrate, nearly all of the available magnesium appeared to be lost.

Neutralization of an acid sandy soil by $CaCO_3$ did not affect the content of available magnesium.

From the results of these earlier experiments, which are recorded in more detail in Ref. [61], it may be concluded that the harmful after-

effect of a dressing with ammonium sulphate upon the magnesium supply of the crop, as observed in Experiments 1312 and 1325, is partly due to loss of available magnesium during the wet autumn and winter following a summer season in which the ammonium sulphate was applied *. Since leaching of the soil does not take place during the summer, it must be concluded that the direct effect of ammonium sulphate on magnesium nutrition is due to an antagonizing effect of NH_4- and H-ions on Mg-uptake. The inhibiting effect of these ions on the development of the root system may also have played a role.

That the harmful after-effect of a manuring with ammonium sulphate is partly due to an increased leaching out of the plant-available magnesium may also be concluded from the field experiments 1084 and 1090. Ammonium sulphate and calcium nitrate were applied in 1949 at the rates of 40, 80 and 120 kg N per ha, in the absence and presence of added magnesium, respectively. In 1950 a uniform manuring of 120 kg N per ha in the form of ammonium nitrate was given to all plots. In both years potatoes were grown. In 1951, when maize was grown on Field 1084 and rye on Field 1090, a uniform dressing of 100 kg N per ha as NH_4NO_3 was given. A basal dressing of P and K was applied each year; magnesium, however, was only given in 1949.

The pH values of the NH_4- and NO_3-plots which differed significantly in the autumn of 1949 were almost equal at the end of 1950 (see Table IX). Notwithstanding the small differences in soil

TABLE IX

Effect of nitrogenous fertilizers on soil pH

Kg N per ha	1949				1950			
	no added Mg		+ Mg		no added Mg		+ Mg §	
	as	cn	as	cn	as §	cn §	as §	cn §
Exp. 1084								
0	5.2	5.2	5.1	5.1	5.3	5.3	5.2	5.2
40	5.0	5.0	4.9	4.9	5.1	5.2	5.0	5.2
80	4.7	5.1	4.6	5.0	5.0	5.1	5.0	5.2
120	4.6	5.0	4.7	5.0	5.2	5.2	5.1	5.4
Exp. 1090								
0	4.4	4.4	4.4	4.4	4.3	4.3	4.4	4.4
40	4.3	4.4	4.2	4.2	4.5	4.3	4.4	4.3
80	4.2	4.4	4.2	4.3	4.1	4.5	4.2	4.5
120	4.2	4.3	4.2	4.4	4.4	4.3	4.3	4.2

§ As, cn and Mg were applied in 1949 only.

* See also the paper by Mulder and Hussain Aleem [43].

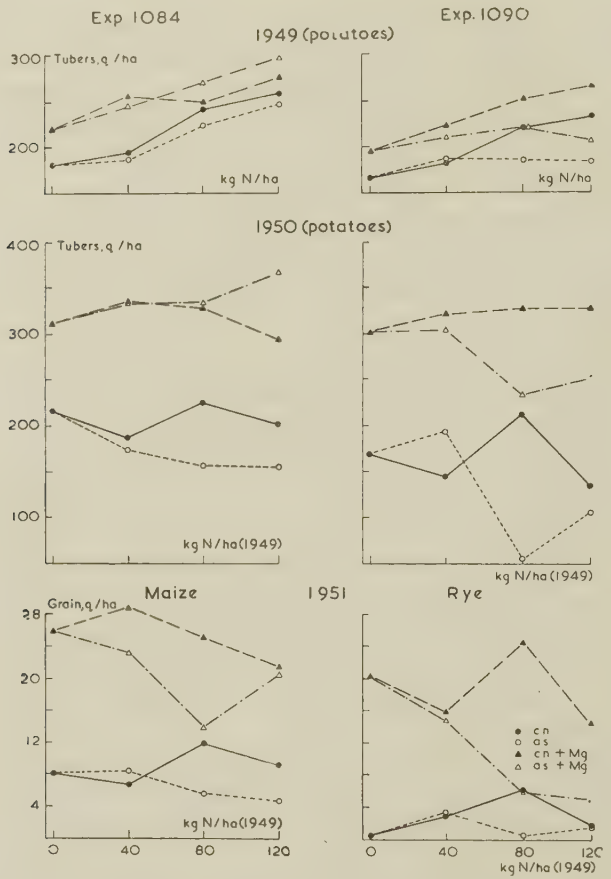


Fig. 9. Direct effect and after-effect of a manuring with calcium nitrate (cn) and ammonium sulphate (as) applied in 1949. In 1950 and 1951 a uniform dressing of ammonium nitrate was given to all plots (120 kg N per ha to the potatoes, 100 kg N per ha to the maize, and 80 kg to the rye). + Mg = 40 kg MgO per ha in the form of $MgSO_4 \cdot H_2O$, applied in 1949.

pH there was a pronounced difference in occurrence of magnesium-deficiency symptoms and in the yield of maize and rye in 1951 between plots dressed in 1949 with ammonium sulphate and those with calcium nitrate, respectively (see Fig. 9). This was not only true of the nil-Mg plots but also of the plots dressed in 1949 with 40 kg MgO per ha. A relatively large proportion of the magnesium, applied in 1949 had apparently been leached out of the soil on the plots dressed with ammonium sulphate in 1949.

DISCUSSION

From the results of the above investigations it may be concluded that the harmful effect of ammonium sulphate and the beneficial effect of nitrate on the magnesium nutrition of crop plants, growing under natural conditions, do not depend on a simple relationship. The following factors are assumed to be responsible for the observed phenomena.

a) Under humid conditions, such as prevail in large parts of Western Europe, a shift of the soil pH in an acid direction following a fertilization with ammonium sulphate will strongly promote the leaching of plant-available magnesium by the autumn and winter rains. This is particularly true when the pH falls below 5 approximately (see Table VIII and Ref. [43] [61]). Under these conditions Mg-ions, adsorbed by soil colloids, are readily exchanged with H-ions so that they are subjected to leaching.

There is no indication that fixation of magnesium by the soil constituents, which may occur in certain soils [32] [49] is a typical feature of light acid soils [61].

b) In addition to the effect on the soil, an increased H-ion concentration may effect the plant. Both the development of the root system and the functioning of the roots may be reduced by an increased acidity of the soil.

The effect of the pH of the nutrient medium on the uptake of inorganic nutrients in general and of magnesium in particular has been studied by a number of authors. Some of them have grown the plants for a considerable length of time in nutrient media, others have studied their uptake during a relatively short period of time. In the former case the pH may have affected the development as well as the functioning of the roots, in the latter the influence on the root development played no part. In the investigations of Arnon [2] (pH range from 5 to 6.7), Wadleigh and Shive [64] (pH range from 3 to 9), and Olsen [45] (pH range from 4 to 9) the effect of the pH of the nutrient medium on the uptake of inorganic nutrients from culture solutions was found not to be very pronounced. In short-term experiments with tomato, lettuce and Bermuda grass (pH range from 3 to 9), Arnon *et al.* [3] found a reduced uptake of P, K, Ca, and Mg, particularly of Ca, at pH 3 and 4. Michael [33] found a considerably reduced uptake of magnesium and calcium by maize

and rye from nutrient solutions of pH 4 as compared with solutions of pH 6 or 7.5. No effect of pH on uptake of K and P was found. The rye experiment lasted 7 days, so that the effect of the pH on the root development in this case cannot have played an important role. Smit and Mulder [61] found a much more poorly developed root system in oats growing in a culture solution of pH 4–4.5 than at pH 6–6.5. There was not much difference in response to added magnesium between plants growing at these pH values. In sand-peat mixtures these authors found the growth of oats much curtailed at pH 3.5 and 4.2, irrespective of amount of added magnesium. At pH 4.6 the plants made normal growth in this medium and there was practically no difference in response to added magnesium between plants grown at pH 4.6, 5.6 and 6.8 (see Table VI).

From the results of these investigations on H-ion concentration, it may be concluded that the effect of low soil pH on magnesium uptake is not the main reason for the occurrence of magnesium deficiency in plants growing in acid soils. This conclusion is in agreement with the observation that addition of magnesium salts to such soils usually produces a healthy plant growth. That maximum yields are not always achieved by this treatment, when compared with Mg + lime, is not surprising, since other conditions, associated with a low soil pH (excess of Mn-ions, fixation of P, *etc.*) are not affected by $MgSO_4$, but are eliminated by liming. That a low soil pH may contribute, however, in the poor development of magnesium-deficient plants on soils already poor in available magnesium may be concluded from the results of Table VII (see also Ref. [61]). From these data it will be seen that mixing of the acid magnesium-deficient soils with $CaCO_3$ free from magnesium, gives an improved plant growth and an enhanced uptake of magnesium, without the content of available magnesium of the soil being affected. A possible explanation of this phenomenon is that a reduced acidity of the soil enables the plant to take up more magnesium owing to a better developed root system and (or) a better functioning of the roots (less competition of H-ions). The added $CaCO_3$ may also have increased the nitrification rate and in addition it may have eliminated other growth-limiting factors.

c) Of much more importance than the influence of the H-ion concentration of the nutrient medium (soil) on the uptake of magnesium is the effect of the kind of nitrogen source applied, am-

monium or nitrate, on absorption and presumably assimilation of magnesium. In the case of ammonium nutrition the absorption of magnesium is strongly inhibited, whereas with nitrate as the nitrogen source it is strongly favoured (Figures 1, 2, 3 and Table II). Although in these experiments the pH of the soil was decreased by ammonium sulphate and slightly increased by nitrate treatment, it must be pointed out that the pH measurements were carried out after the plants had completed their growing period. At a young stage when only small amounts of nitrogen had been taken up by the plants and the resulting shift in pH of the soil was also small, the effect of the kind of nitrogen source applied on the magnesium supply was even more pronounced. This demonstrates that the effect of the nitrogen compound on magnesium uptake must to be sought within or on the surface of the plant roots rather than in the soil (see also the foregoing considerations under *b*).

The effect of applied nitrogen compound on uptake of other inorganic nutrients has also been observed by a number of other workers [2 5 16 31 52 53 64]. In general it was found that plants grown in a nitrate medium were higher in cations (K, Ca, Mg) than those grown in an ammonium medium. Conversely, the content of S and P was often higher in NH_4-plants than in nitrate plants. Of the cations, uptake of Ca and Mg was found in a number of cases to be more clearly affected by the nitrogen compound applied than that of K [5 31].

To explain the observed phenomena, it must be realized that the form in which the nitrogen is absorbed by the plant roots, cation or anion, has a dominating effect on the ratios

$$\frac{\text{absorbed } NH_4\text{-ions}}{\text{sum of absorbed other cations}} \text{ and } \frac{\text{absorbed } NH_4\text{-ions}}{\text{absorbed Mg-ions}}$$

in view of the large amount of nitrogen used by the plant. Values well above 1 may be found for the former ratio and above 10 for the latter, in plants dressed with an ammonium compound and growing in a medium in which no nitrification occurs.

A further point of interest is that in most plant tissues the absorbed ammonium ions soon after their entrance into the cytoplasm are assimilated into organic N-compounds. This involves an exchange with H-ions within the cytoplasm. As a result a high concentration of hydrogen ions will be found in the outer root cells of plants supplied with ammonium compounds.

Nightingale[44] growing dormant N-absorbing apple trees in a sand-culture medium with constant renewal at the rate of 36 l per 24 h at pH 6.0 with ammonium sulphate as the sole N-compound, found pH-values of 4.0–4.5 at the absorbing surface and tips of the fine fibrous roots. In a preliminary experiment in which the ammonium concentration was higher, pH values of 2.8–3 were found by this author at the root surface and the outer corticial cells. In the latter case the roots were abnormal, due to the high acidity. When the mean pH of the root tissues was measured, no difference was found between nitrate and ammonium plants. In contrast with this result, Mulder[38] found clearly lower pH-values of macerated root and shoot tissues of pea plants grown in nutrient solutions supplied with NH_4-N than in tissues of nitrate plants (see Table X). Similar results were obtained by Gouny[16] with maize and lupine plants.

TABLE X

Effect of the nitrogen compound and the pH of the culture solution on the pH of macerated leaf and root tissues of pea plants *)

N-compound added	Leaves and stems				Roots			
	pH=5.2	pH=6	pH=7	pH=7.6	pH=5.2	pH=6	pH=7	pH=7.6
No N added	5.65	5.87	6.00	6.06	5.52	5.58	5.72	5.87
KNO_3	6.14	6.17	6.32	6.28	5.78	5.88	5.98	6.18
$(NH_4)_2SO_4$	5.80	5.81	6.25	6.38	5.56	5.58	5.75	6.03
$(NH_4)_2HPO_4$	5.80	5.87	6.23	6.39	5.67	5.79	5.86	6.03

* For more detailed results see Ref. [38].

From the foregoing considerations it is concluded that the high concentration of NH_4- and H-ions at the root-cell surface and within the cytoplasm of root cells is the most plausible explanation of the occurrence of severe magnesium deficiency in plants growing in acid soils dressed with ammonium sulphate. That this effect is more pronounced, the higher the concentration of $(NH_4)_2SO_4$ added (Fig. 1), will be readily understood. Ions with a relatively high mobility like K will be less affected by this H-barrier than ions with a low mobility like Mg and Ca.

The beneficial effect of nitrate on uptake of cations, particularly of Ca- and Mg-ions, can be explained in a similar way. In the case of nitrate nutrition there may be assumed to occur a large excess of NO_3-ions in the outer layers of the root cells. Although nitrate nitrogen is less readily assimilated than ammonium nitrogen and therefore assimilation presumably will be extended over a greater number of cells, a certain proportion of the absorbed nitrate ions will also be assimilated in the cytoplasm of the root cells soon after their

absorption. Assimilation of NO_3-ions which is a H-ion-consuming process takes place after exchange of NO_3- against HCO_3-ions. The presence of large amounts of the latter ions causes a binding of H-ions within the cytoplasm (see Table X) as well as at the root surface and in the medium surrounding the roots (see Ref. [44]). Since H-ions have to be considered as strongly competitive ions with respect to cations like Ca- and Mg-ions, the highly beneficial effect of nitrate ions on magnesium nutrition as observed in the present paper seems logical.

It may be asked if the explanation given of the observed phenomena fits in with the recently developed theories on ion absorption. From a number of investigations [1 8 9 10 24 30 46 59 63] it has become clear that metabolic processes are involved in the absorption of inorganic nutrients by plant cells. According to the L u n d e g å r d h theory [8 9 10 30] the primary phase of absorption would be an adsorption at the cell surface, followed by an active, cytochrome-mediated, transport of anions through the cytoplasm. The cations would move non-metabolically through exchange against H-ions produced by dehydrogenase activity within the cell.

Other workers [12 46 47] have proposed the presence in the cytoplasm of metabolically generated carrier substances which combine with cations or anions, respectively, ($HR + M^+ \leftrightarrows MR + H^+$ (*1*), $ROH + A^- \leftrightarrows RA + OH^-$ (*2*)) and which are responsible for the transport of ions through at least part of the cytoplasm, through which the ions as such are unable to move.

Considering the L u n d e g å r d h scheme the NH_4 (H)—Mg interaction could be seen mainly as an ion competition at the adsorbing surfaces of the cell. In addition the large amounts of H-ions resulting from the assimilation of NH_4-ions, undoubtedly would counteract the movement of Mg- and Ca-ions through the cytoplasm. The beneficial effect of nitrate can be explained by removing H-ions upon assimilation of the NO_3-ions.

In the case of the carrier theory the effect of the NH_4- (H-)-ions could be explained by assuming a promotion of the reversal of reaction (*1*) owing to the H-ions formed in the cytoplasm upon assimilation of NH_4-ions. Whether in addition NH_4 and Mg compete for a binding place on a specific carrier, as is assumed to occur with K and Rb [12], is as yet unknown.

SUMMARY

1. Wheat and oat plants were grown in acid soils, with and without added magnesium, at different levels of added nitrogen in the form of calcium or sodium nitrate, ammonium sulphate and ammonium nitrate (pot experiments). With increased rate of ammonium-sulphate addition the plants became increasingly deficient in magnesium. With sodium or calcium nitrate as the nitrogen source no magnesium deficiency occurred, while ammonium nitrate took an intermediate position. Similar results were obtained with wheat grown under field-experiment conditions.

2. In a pot experiment with wheat plants in which part of the roots were grown in a soil low in available magnesium and the other part in a sand-peat mixture free from magnesium, the beneficial effect of nitrate on magnesium nutrition was observed only when nitrate had been mixed with the soil, *i.e.* when magnesium and nitrate had to be taken up by the same roots.

3. The beneficial effect of nitrates, of calcium as well as of ammonium, on the magnesium nutrition of potato plants was found to be very pronounced. In a number of cases more severe symptoms of magnesium deficiency occurred in plants dressed with 80 kg of MgO per ha as $MgSO_4 \cdot H_2O$ in the absence of added nitrogen than in plants dressed with 140 kg of nitrogen in the form of ammonium nitrate limestone without added magnesium.

4. To elucidate the nitrogen—magnesium interactions, a comparison was made between direct effect (first year), after-effect (second year) and cumulative effect of the ammonium-sulphate and calcium-nitrate dressings, applied on a few experimental fields laid out on acid soils moderately poor in available magnesium. It was found that both the direct effect and the after-effect of an application of ammonium sulphate on the magnesium supply to crop plants were detrimental. Nitrate exerted its beneficial effect only in the year of application.

The unfavourable after-effect of ammonium-sulphate dressings on the magnesium nutrition was found to be due partly to a leaching of the available magnesium from the soil by the winter rains after the fall of soil pH. In addition the increased hydrogen-ion concentration in the soil may have an adverse effect on uptake of magnesium, either through a reduced development of the root system and a reduced functioning of the roots or through a decreased nitrification.

The detrimental direct effect of ammonium sulphate on the magnesium supply to the plants was assumed to be due to a competitive effect of NH_4- and H-ions on Mg-uptake. These ions are formed in great excess in the root tissues soon after the absorption of the NH_4-ions. Similarly the beneficial effect of nitrate on magnesium uptake was attributed to the decrease of H-ions within the cytoplasm after the assimilation of the nitrate by the root cells.

The results obtained in the present investigation were discussed in connection with recently developed theories on ion absorption.

ACKNOWLEDGEMENT

The author is much indebted to Dr. J. L. Harley, Department of Botany, University of Oxford, for reading and improving the text of this paper.

Received November 1, 1955.

REFERENCES

1 Arisz, W. H., Contribution to a theory on the absorption of salts by the plant and their transport in parenchymatous tissue. Proc. Kon. Nederland. Akad. Wetenschap. (Amsterdam) **48**, 420–426 (1945).
2 Arnon, D. I., Effect of ammonium and nitrate nitrogen on the mineral composition and sap characteristics of barley. Soil Sci. **48**, 295–307 (1939).
3 Arnon, D. I., Fratzke, W. E. and Johnson, C. M., Hydrogen ion concentration in relation to absorption of inorganic nutrients by higher plants. Plant Physiol. **17**, 515–524 (1942).
4 Bear, F. E., Cation and anion relationships in plants and their bearing on crop quality. Agron. J. **42**, 176–178 (1950).
5 Bolle-Jones, E. W, Comparative effects of ammonium and nitrate ions on the growth and composition of *Hevea brasiliensis*. Physiol. Plantarum **8**, 606–629 (1955).
6 Boynton, D., Magnesium nutrition of apple trees. Soil. Sci. **63**, 53–58 (1947).
7 Boynton, D. and Burrell, A. B., Potassium-induced magnesium deficiency in the McIntosh apple tree. Soil Sci. **58**, 441–454 (1944).
8 Burström, H., Mineralstoffwechsel. Fortschr. Botanik **12**, 216–246 (1949).
9 Burström, H., Mineralstoffwechsel. Fortschr. Botanik **13**, 250–268 (1951).
10 Burström, H., Mineralstoffwechsel. Fortschr. Botanik **14**, 290–312 (1954).
11 Castenmiller, G. M., Was ist mit dem Magnesium los? In: Zwei Verbündete: Kalium und Magnesium, p. 14–35. Deutsche WarenVertriebsgesellschaft m.b.H. Berlin W8 (without date).
12 Epstein, E. and Hagen, C. E., A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. Plant Physiol. **27**, 457–474 (1952).
13 Ferrari, Th. J. and Sluijsmans, C. M. J., Mottling and magnesium deficiency in oats and their dependence on various factors. Plant and Soil **6**, 262–299 (1955).
14 Gehring, A., Neuere Anschauungen über die düngende Wirkung von magnesiumhaltigen Düngemitteln. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. A **15**, 300–310 (1930).
15 Gehring, A., Creuzburg, U., Pommer, E., Stockhaus, H. von, and Wehrmann, O., Weitere Untersuchungen über die Wirkung des Magnesiums auf den Ernteertrag des Bodens. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. A **29**, 335–380 (1933).
16 Gouny, P., Observations sur les particularités de l'alimentation ammoniacale en l'absence et en présence de calcaire. Ann. Agron. (Paris) **6**, 589–614 (1955).
17 Hoblyn, T. N., Manurial trials with apple trees of East Malling 1920–1939. J. Pomol. Hort. Sci. **18**, 325–343 (1940).
18 Honert, T. H. van den, and Hooymans, J. J. M., On the absorption of nitrate by maize in water culture. Acta Botan. Neerland. **4**, 376–384 (1955).
19 Hudig, J. and Meyer, C., De Hooghalensche ziekte, een nieuwe bodemziekte op zand- en veengronden. Directie van den Landbouw, 's-Gravenhage (1918).

20 Itallie, Th. B. van, Magnesiummangel und Ionenverhältnisse in Getreidepflanzen. Bodenk. u. Pflanzenernähr. **5**, 303–334 (1937).
21 Itallie, Th. B. van, Cation equilibria in plants in relation to the soil. Soil Sci. **46**, 175–186 (1938).
22 Itallie, Th. B. van, Cation equilibria in plants in relation to the soil. II. Soil Sci. **65**, 393–416 (1948).
23 Jacob, A., Magnesia: der fünfte Pflanzenhauptnährstoff. 110 pp. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1955).
24 James, W. O., Plant Respiration, p. 249–255. Clarendon Press, Oxford (1953).
25 Jessen, W., Die Marmorierung der Blätter der Getreidearten, eine Magnesiummangelerscheinung. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. A **22**, 129–135 (1931).
26 Kardos, L. T. and Joffe, J. S., The preparation, composition and chemical behavior of the complex silicates of magnesium, calcium, strontium and borium. Soil Sci. **45**, 293–307 (1938).
27 Krackenberger, H. F. and Peterson, W. J., Effect of environment on the magnesium content of plants. Southern Coop. ser. bull. **36**, 98–118 (1954).
28 Lemmermann, O., Jessen, W. and Lesch, W., Versuche über die Wirkung von Magnesiumsalzen auf verschiedenen Böden. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. B **11**, 489–507 (1932).
29 Loew, O., Über die physiologischen Functionen der Calcium- und Magnesiumsalze im Pflanzenorganismus. Flora **75**, 368–394 (1892).
30 Lundegårdh, H., Anion respiration. The experimental basis of a theory of absorption, transport and exudation of electrolytes by living cells and tissues. Symposia Soc. Exptl. Biol. (Cambridge) **8**, 262–296 (1954).
30*a* Maschhaupt, J. G., In hoeverre kunnen K, Na, Ca en Mg elkander in de plant vervangen? Verslag. Landbouwk. Onderzoek. **40**, 1025–1096 (1934).
31 Mc Evoy, E. T., The relation of ammonium and sulphate ions to magnesium-deficiency in tobacco. Can. J. Agr. Sci. **34**, 281–287 (1954).
32 MacIntire, W. H., Shaw, W. M. and Robinson, B., The distinction between magnesium absorbed and that exchangeable, four years after lysimeter incorporation of oxides and carbonates. Soil Sci. **37**, 289–303 (1934).
33 Michael, G., Über die Aufnahme und Verteilung des Magnesiums und dessen Rolle in der höheren grünen Pflanze. Bodenk. u. Pflanzenernähr. **25**, 65–120 (1941).
34 Mulder, D., Magnesium deficiency in fruit trees on sandy soils and clay soils in Holland. Plant and Soil **2**, 145–157 (1950).
35 Mulder, D., Nutritional studies on fruit trees. II. The relation between potassium, magnesium and phosphorus in apple leaves. Plant and Soil **4**, 107–117 (1952).
36 Mulder, E. G., On the use of micro-organisms in measuring a deficiency of copper, magnesium and molybdenum in soils. Antonie van Leeuwenhoek **6**, 99–109 (1940).
37 Mulder, E. G., The microbiological estimation of available copper and molybdenum in soil and plant material. Analytica Chimica Acta **2**, 793–800 (1948).
38 Mulder, E. G., Investigations on the nitrogen nutrition of pea plants. Plant and Soil **1**, 179–212 (1948).
39 Mulder, E. G., Importance of copper and molybdenum in the nutrition of higher plants and micro-organisms. In: Trace Elements in Plant Physiology, p. 41–52. Waltham, Mass. U.S.A. (1950).
40 Mulder, E. G., De Magnesiumvoeding van Landbouwgewassen, in het bijzonder in verband met de Stikstofbemesting. 16 pp. Landbouwk. Bureau der Nederl. Stikstofmeststoffen-Industrie, 's-Gravenhage (1951).
41 Mulder, E. G., The essentiality of trace elements for micro-organisms and their microbiological determination. Proc. 6th Internat. Microbiol. Congr. Rome **6**, 293–313 (1953).

42 Mulder, E. G., Molybdenum in relation to growth of higher plants and microorganisms. Plant and Soil **5**, 368–415 (1954).
43 Mulder, E. G. and Hussain Aleem, M. I., Use of *Aspergillus niger* for the determination of plant-available magnesium in soil. Plant and Soil **8** (in the press) (1956).
44 Nightingale, G. T., Ammonium and nitrate nutrition of dormant delicious apple trees at 48°F. Botan. Gaz. **95**, 437–452 (1933).
45 Olsen, C., The significance of concentration for the rate of ion absorption by higher plants in water culture. 4. The influence of hydrogen ion concentration. Physiol. Plantarum **6**, 848–858 (1953).
46 Overstreet, R. and Jacobson, L., Mechanisms of ion absorption by roots. Ann. Rev. Plant Physiol. **3**, 189–206 (1952).
47 Overstreet, R., Jacobson, L. and Handley, R., The effect of calcium on the absorption of potassium by barley roots. Plant Physiol. **27**, 583–590 (1952).
48 Popp, M., Die Düngewirkung der Magnesia. Landwirtsch. Versuchssta. **124**, 129–152 (1936).
49 Prince, A. L., Zimmerman, M. and Bear, F. E., The magnesium-supplying powers of 20 New Jersey soils. Soil Sci. **63**, 69–78 (1947).
50 Russell, J. S., Bourg, C. W. and Rhoades, M. F., Effects of nitrogen fertilizer on the nitrogen, phosphorus and cation contents of brome grass. Soil Sci. Soc. Am. Proc. **18**, 292–296 (1954).
51 Schachtschabel, P. and Isermayer, H., Die Magnesium-Bestimmung mittels Titangelb. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. **67**, 1–8 (1954).
52 Scharrer, K. and Jung, J., Der Einfluss der Ernährung auf das Verhältnis von Kationen zu Anionen in der Pflanze. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. **71**, 76–94 (1955).
53 Scharrer, K. and Jung, J., Weitere Untersuchungen über die Nährstoffaufnahme und das Verhältnis von Kationen zu Anionen in der Pflanze. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. **71**, 97–113 (1955).
54 Schmitt, L., Die Wirkung des Magnesiumions auf kalkarmen Mineralböden. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. A **29**, 50–58 (1933).
55 Schmitt, L., Altes und Neues zur Magnesiumdüngungsfrage. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. **42**, 129–143 (1936).
56 Schuffelen, A. C., Is de plantengroei afhankelijk van de ionenverhouding in den grond? II. De ionenverhouding in de grond en de rentabiliteit der meststoffen. Landbouwk. Tijdschr. **52**, 845–868 (1940).
57 Schuffelen, A. C. and Loosjes, R., The importance of the growth medium for the absorption of cations by plants (A working hypothesis). Proc. Nederl. Akad. Wetenschap. Amsterdam **45**, 726–733 (1942).
58 Schuffelen, A. C. and Loosjes, R., The influence of the ion activity and the ion concentration in the medium of the absorption of cations by plants. Proc. Nederl. Akad. Wetenschap. Amsterdam **45**, 944–952 (1942).
59 Scott Russell, R., The relationship between metabolism and the accumulation of ions by plants. Symposia Soc. Exptl. Biol. (Cambridge) **8**, 343–366 (1954).
60 Selke, W., Beziehungen zwischen der Wirkung von Kalk-, Magnesium- und Stickstoffdüngung auf einen stark versauerten Sandboden. In: Zwei Verbündete: Kalium und Magnesium, p. 153–191. Deutsche Waren-Vertriebsgesellschaft m.b.H., Berlin W8 (without date).
61 Smit, J. and Mulder, E. G., Magnesium deficiency as the cause of injury in cereals. Mededeel. Landbouwhoogesch. **46**, no 3. 43 pp. (1942).
62 Stout, P. R., Meagher, W. R., Pearson, G. A. and Johnson, C. M., Molybdenum nutrition of crop plants. I. The influence of phosphate and sulphate on the absorption of molybdenum from soils and solution cultures. Plant and Soil **3**, 51–87 (1951).

63 Sutcliffe, J. F., Cation absorption by non-growing plant cells. Symposia Soc. Exptl. Biol. (Cambridge) **8**, 325–342 (1954).

64 Wadleigh, V. H. and Shive, J. W., Base content of corn plants as influenced by pH of substrate and form of nitrogen supply. Soil Sci. **47**, 273–283 (1939).

65 Wallace, T., Chemical investigations relating to magnesium deficiency of fruit trees. J. Pomol. Hort. Sci. **18**, 145–160 (1940).

66 Walsh, T. and O'Donohoe, T. F., Magnesium deficiency in some crop plants in relation to the level of potassium nutrition. J. Agr. Sci. **35**, 254–263 (1945).

67 Welch, Jr., H. V., Wallace, A. and Mueller, R. T., Influence of factorially combined levels of cations and nitrate ions adsorbed on ion-exchange resins on the nutrient absorption by plants. Soil Sci. Soc. Am. Proc. **18**, 137–140 (1954).

Plant and Soil VII, no 4 June 1956

ON COMPONENT AND COMPOSITE FLUX OF MATTER THROUGH NATURAL SYSTEMS

by T. C. BROYER

Department of Soils and Plant Nutrition, University of California, Berkeley

INTRODUCTION

Recently, reports of the American Standards Association, Subcommittee on Fluid Permeation of the Committee on Ground Water [1 18] have come to the attention of the author. These articles have reviewed equational relations among factors concerned with the flow of fluids through natural media. To the investigator interested in soils as an environmental medium for plant development, this problem involves the passage of solutions through the terrestrial aquifer [1 15 16 18]. Another facet of agricultural research concerns the study of independent migration of components of such solutions from soils to plants. Theoretical and practical aspects of the latter have been discussed in the literature[4 5 6 7 8]. It appears that these two problems warrant interrelated attention. The present paper correlates them in general mathematical terms.

DISCUSSION

A distinction between component migration and composite flow was drawn earlier [6] (cf Ref. [14], p. 74). One viewpoint would define them to be, respectively, first, the undirected or directed independent flux of a component of solution relative to another component and/or a boundary, and second, the directed flux of a composite solution or fluid relative to a boundary through which it may pass. The former is often recognizable as diffusion in a liquid medium of a single phase. Frequently, the system consists of two or more phases separated by a differentially permeable boundary. Directed independent

movement of water across the latter type of system is termed osmosis.

Hydrologists have proposed numerous equational forms for evalution of fluid flow through natural media [1 18]. One derived generalized equation is

$$\Sigma M_r = k \times \varrho \times \frac{1}{\eta} \times A \times \left(\frac{\Delta P}{L}\right), \tag{1}$$

in which ΣM_r is the total mass rate of flow as a mass per unit time; k is a coefficient generally related to the permeability of the medium in dimensions equivalent to an area; ϱ is the density of the fluid; η is the viscosity of the fluid; A is the total area of cross section of the medium; and $(\Delta P/L)$ or (∇P) is the pressure gradient. This equation, for comparison with others later, may be reset to read

$$R = k \times \varrho \times \frac{1}{\eta} \times \left(\frac{\Delta P}{L}\right), \tag{2}$$

or

$$R = \sigma \times \left(\frac{\Delta P}{L}\right), \tag{2a}$$

in which R equals $\Sigma M_r/A$, and is the rate of flow as a mass per unit area per unit of time; σ is the fluid conductivity; and other factors are the same as in equation 1. Equation 2 may be expressed dimensionally as follows:

$$\frac{m}{L^2 t} = L^2 \times \frac{m}{L^3} \times \frac{Lt}{m} \times \left(\frac{m}{Lt^2} \times \frac{1}{L}\right). \tag{3}$$

It may be noted that k in equation 2 has dimensions equivalent to that of an area. As such, it might be construed to be a measure of an effective area for flow through the boundary medium, at least for simple porosity situations. Many investigators include a dimensionless coefficient as a part of this k term, *e.g.*, $C \times L^2 = k$ (see Ref. [1]). Then, some regard the L^2 portion to be related to "particle size" or "tube diameter" in the boundary medium, or "a length parameter which characterizes statistically the fineness or coarseness of the fluid network"; the dimensionless coefficient portion "depending upon the shape of the interstices through which the fluid flows" [1].

For discussions on permeability in animate and inanimate systems

references [1 3 9 11 14 15 16 17] and [18] should be consulted. Particular attention may be drawn to a membrane "constant" recognized by some biologists (Ref. [9], pp. 272–284) in Fick's law of diffusion, and to the comparison of this relation to the equational analysis of migration, thermodynamically derived [7].

Thus, the terms of Fick's law ([9], equation 4) may be grouped such that

$$\Sigma M_r = \frac{\Sigma M}{t} = k_d \times \frac{A}{h} \times \Delta C, \tag{4}$$

where dimensionally,

$$\frac{M}{t} = \frac{L^2}{t} \times \frac{L^2}{L} \times \frac{M}{L^3} \tag{4a}$$

and in which ΣM_r or $\Sigma M\,t$ is the total mass of material diffusing per unit time; k_d is the diffusion coefficient, ΔC is the concentration difference as mass per unit volume; and A/h is considered to be a membrane "constant" characterized by the ratio between an effective area and a effective thickness of boundary.

Elsewhere, the energetics of independent movement of materials through a two-phased solution system have been treated [7]. This was based on the thermodynamic properties of the components of the system, presuming for simplicity of discussion, an isothermal situation. Here, the rate of flux of a component of the system was assumed to be proportional to its energy intensity (volumned specific free energy) gradient between phases. Thus,

$$R = k_\varphi \times \left(\frac{\Delta F}{L} \right), \tag{5}$$

in which R is the rate of net flux or migration as a mass per unit area per unit time normal to the energy intensity difference; k_φ is a coefficient of flux; and $\Delta F\ L$ (or ∇F) is an energy intensity (volumned specific free energy) gradient. The last term was defined to be equal to (for practical purposes), but not identical with (from a theoretical standpoint), a pressure gradient [8]. Dimensionally, equation 5 is expressed by

$$\frac{m}{L^2 t} = t \times \frac{\frac{mL^2}{t^2/n}}{L^3/n} \times \frac{1}{L} = t \times \frac{mL^2/t^2}{L^3} \times \frac{1}{L} \Bigg) \tag{6}$$

in which $mL^2/t^2/n/L^3/n$ is the partial molal free energy difference of the component between phases divided by its partial molal volume at the reference state (n, designating the number of moles). These states are pure water for the solvent component and infinite dilution for the solute in solution [13]. Where the energy intensity gradient is regarded as equal to (for practical purposes), but not identical with (from a theoretical standpoint) a pressure difference per unit length of boundary, equation 6 becomes

$$\frac{m}{L^2t} = t \times \left(\frac{m}{Lt^2} \times \frac{1}{L}\right). \tag{6a}$$

The flux coefficient, k_φ of equation 5, was further defined to equal the product between a second coefficient, there termed a relative permeability coefficient characteristic of the boundary, and the mass tending to move *freely* per unit area per unit time under a unit energy intensity gradient [7]. Thus,

$$k_\varphi = k_p \times \frac{m}{L^2t} \times \frac{1}{\frac{\Delta F}{L}} \tag{7}$$

Equation 7 is expressed dimensionally by

$$t = n \times \frac{m}{L^2t} \times \left(\frac{t^2}{mL^2} \times \frac{L^3}{1} \times \frac{L}{1}\right), \text{ migration usage,} \tag{7a}$$

or, by

$$t = n \times \frac{m}{L^2t} \times \frac{L^2t}{m} \times \frac{L}{1}, \text{ flow usage.} \tag{7b}$$

From equation 7, in dimensions,

$$k_p = \frac{m}{L^2t} \times \frac{1}{t} \times \left(\frac{t^2}{mL^2} \times \frac{L^3}{1} \times \frac{L}{1}\right) = n, \text{ migration usage,} \tag{8}$$

or

$$k_p = \frac{m}{L^2t} \times \frac{1}{t} \times \left(\frac{Lt^2}{m} \times \frac{L}{1}\right) = n, \text{ flow usage.} \tag{8a}$$

In these relationships, k_p, the relative permeability coefficient, is a pure number, *i.e.*, without dimension. The boundary concerned

here is the medium through which flux takes place, *i.e.*, the solution interface or/and the structural object, being limited in effect by the latter where the former is set as unity.

In equations 5–8 inclusive, all area (L^2) and length (L) parameters are regarded to be actual measurable dimensions in contrast to so-termed effective area or effective length, therefore necessitating the inclusion of the relative permeability term. Actual dimension is the sense required by definition in k_φ of equation 5 and in k_d of equation 4. The terms of equation 5 may be regrouped for analogy with equation 4. Thus, equation 5 may be viewed as

$$\frac{m}{At} = k'_\varphi \times \left(\frac{\Delta F}{h}\right), \tag{9}$$

or regrouped (cf equation 4) as

$$\Sigma M_r = \frac{\Sigma M}{t} = k'_\varphi \times \frac{A}{h} \times \Delta F. \tag{9a}$$

Here A/h similarly may be regarded as a ratio of effective area to effective length of boundary. However, in k_φ, its L^2 and L parameters (equations 7*a* and 7*b*) are actual dimensions. The term A/h in equation 9*a* is thus an absolute permeability measurement (membrane "constant") and k'_φ does not contain the relative permeability coefficient which was required where all L^2 and L parameters were actual dimensions. It would seem preferable, however, to retain all L^2 and L parameters as actual dimensions with inclusion of k_p in k'_φ. The relationship of A/h to k_p may be gleaned from equational comparison. Note that the A term in σ of equation 2*a* bears no relationship to A in the A/h term just discussed (*i.e.*, contrast k and A in equation 1).

From equations 5–8, the velocity of the constituent component flux is given by

$$v = R \times \frac{1}{\varrho}, \tag{10}$$

and in dimensions by

$$\frac{L}{t} = \frac{m}{L^2 t} \times \frac{L^3}{m}; \tag{10a}$$

the total volume rate of flux is given by

$$\Sigma V_r = R \times A = \frac{1}{\varrho}, \tag{11}$$

and in dimensions by

$$\frac{L^3}{t} = \frac{m}{L^2 t} \times \frac{L^2}{1} \times \frac{L^3}{m}; \tag{11a}$$

the total mass rate of flux is given by

$$\Sigma M_r = R \times A, \tag{12}$$

and in dimensions by

$$\frac{m}{t} = \frac{m}{L^2 t} \times \frac{L^2}{1}. \tag{12a}$$

Thermodynamic relations do not concern rates or paths of processes, but properties of components within systems. Compare the use of partial molal free energies with those per unit mass (where the mass is the molecular weight) or with those per unit volume (where the volume is the partial molal volume at the reference state) [8]. Substitution of the former (cf Bodman [18]) for a factor equal to pressure in dimension, leads to a velocity term in place of R in equation 5. Conversion to the latter, for discussion, may be made by application of a density term, specifically equal to the mass per mole of the component divided by its molal volume at the reference state. The resultant equation yields a permeability term k with dimensions L^2 as in equations 2 and 3; the energy intensity gradient, thus modified by the specific density term, being commensurate then with a pressure gradient. No advantage, however, would seem to accrue from this circuitous approach toward a generalized concept of flux.

Comparison may be drawn now, between the composite flow equations (equations 1–3) and those characteristic of component migration (equations 5–8). Thus equations 2 and 5 are similar. The factor resultant from $k \times \varrho \times 1/\eta$ in equation 2 (earlier termed the permeability by Darcy [1 15 16 18]; cf. Ref. [6]), is comparable with k_φ in equation 5. Many hydrologists [1 18] now designate the former as the fluid conductivity of the medium (symbolized by σ in equation 2*a*), while the latter has been termed a flux coefficient [7]. Within these two, one difference is drawn. In the former, the factor k is defined as

the permeability of the medium restricting flow and though recognized to be a resultant of more than one parameter (note dimensionless coefficient often included, *e.g.*, as $C \times L^2$), it may be regarded (loosely ly perhaps) as an effective "area" for movement in contrast with a unit actual cross sectional area of boundary. Here, the permeability of a porous medium is unity where the rate of flow through it in mass per unit actual cross sectional area per unit time, of a fluid of unit viscosity and density, under a unit pressure gradient, and "conditions of viscous "flow" is unity. In the latter coefficient k_φ, the relative permeability coefficient is unity for free migration through a unit actual cross sectional area of boundary. This relative permeability coefficient is obviously qualitatively equivalent to the permeability term referred to immediately above. Thus there is a real similarity between these, though inconsistency seemed possible because of dimensional difference.

One approach obtains for reconciling the two forms of equational approach. Although an effective area may be regarded to be a resultant measure of the permeability factor in media where porosity is the only variable, situations arise with natural systems where porosity *per se* may not be the only variable. Application of a dimensionless coefficient as separate from area *per se*, would appear to be a more general case applicable to all situations, and as such, may be favored for use. This permeability product ($C \times L^2$) still is not dimensionally commensurate with the relative permeability factor otherwise discussed. If, however, the L^2 term is set at unity for all situations and the dimensionless coefficient is assumed to evaluate as a resultant all parameters related to the nature of the boundary medium, then this latter coefficient would be commensurate dimensionally and completely equivalent and equal to the relative permeability coefficient physico-chemically derived. For concordance, therefore, it is proposed that equations 2 and 5 respectively, read: For equation 2,

$$R = k_p \times L^2 \times \varrho \times \frac{1}{\eta} \times \left(\frac{\Delta P}{L}\right), \tag{13}$$

in which k_p is the same as k_p in equation 7; L^2 is unit actual cross sectional area of the boundary medium, or some equivalent; and $k_p \times L^2$ is equivalent in all respects to k in equation 2 or $C \times L^2$ as represented generally in equations of the hydrologist except that L^2

here is delimited to unity. For equation 5,

$$R = k_{\varphi}\left(\frac{\Delta F}{L}\right) \tag{5}$$

as before, in which k_{φ} is equivalent in all respects (as qualified above) to

$$k_{p} \times \left(L^2 \times \varrho \times \frac{1}{\eta}\right), \textit{i.e.},$$

$$k_{p} \times \left(L^2 \times \varrho \times \frac{1}{\eta}\right) = k_{p} \times \frac{m}{L^2 t} \times \frac{1}{\frac{\Delta F}{L}} \tag{14}$$

where the L^2 term is set at unity. Where a particular pressure difference situation is considered only (all conditions constant with time), the composite flux as mass per unit area per unit time per unit energy intensity (or pressure) gradient is directly proportional to the reciprocal of the kinematic viscosity η/ϱ of the fluid.

Apart from a seeming distinction between usages of permeability, the general concordance of equational approach for component migration and composite flow is obvious. The investigator may use either approach as may be preferred, recognizing the comparative limitations imposed on the use of an effective "area" of flow or delimitation of this L^2 term to unity.

It is interesting to contemplate that both equations discussed are of practical use. As amply stated, the migration equation deals with the flux of a component of solution; the solvent water is particularly concerned here. Energetically each component migrates independently, especially where its energy intensity is of intrinsic nature, *i.e.*, related alone to composition differences in solution in space [5 8]. Where extrinsic pressures are concerned in addition, the energy intensity of each component is modified in direct relation to the pressure applied. Where pressure is concerned in particular therefore, the energy intensities for flux of both components are equally modified, *i.e.*, in effect leading to conditions requisite for composite flux in the direction of the applied net pressure. Similar proportional effects are obtained through other influences of extrinsic nature [8]. When and where may composite flow take precedence over constituent component migration? This would obtain when and where as a result of pressure differences in space, resultant flux tendency

relative to a reference boundary is less restricted of realization than the same tendency of one component of solution relative to other components. Obviously, the magnitude of the permeability of the medium is the governing factor implied.

A solution system may be exemplified for discussion purposes. This is diagrammed in Figure 1. Two general cases may be discussed. In the first, identical solutions in the two phases may be considered. Where the pressure P_e and P_i are equal and opposite, the escaping tendencies or energy intensities of solute or solvent are equal in the two directions. The escaping tendencies of the components are not necessarily equal to each other. Solute or solvent tends to migrate across the hypothetical boundary M with equal rates in the two directions, *i.e.*, a steady state of dynamic equilibrium is established between phases. There is no net migration in either direction. Since the hydrostatic pressures in e and i are equal, there is no tendency

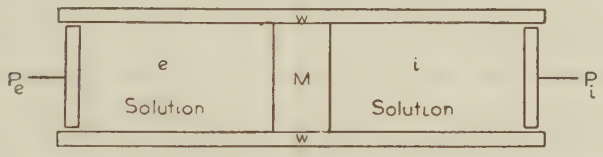


Fig. 1. Diagramatic example of a system for discussion of migration and flow of materials. The external (e) and internal (i) phases contain solution of equal or unequal concentrations. M is a hypothetical or real boundary; where hypothetical, movement in either direction is free for migration of either solute or solvent component or for composite flow of solution; where real, movement is differentially restricted. W is a wall or boundary delimiting a macro-cross-sectional area. P_e and P_i are pressures on the external and internal phases, respectively.

toward composite flow of solution in either direction. Where the pressures P_e and P_i differ by one atmosphere (*e.g.*, $P_e = 1$ atm and $P_i = 2$ atm), the energy intensities of solute or solvent differ between the two phases. The escaping tendency of the solute and the solvent are equally enhanced under increased pressure, equal to a difference between e and i of one atmosphere volumned specific free energy [4 5 6 7 8]. Solute or solvent will tend to migrate from i to e. Since the energy intensity difference is equal for both solvent and solute, they will tend to move together laterally across the free hypothetical boundary as a composite flow, though energetically

they tend to move independently. If the boundary is restricting to rate of migration of either or both components the flux rates may differ between them, typical, for example, of osmosis. Carried toward a limit, the flux rates, for either component or both, may approach zero. For simple physical porosity restrictions a relatively macro-pore system may afford a permeability approximately equal for either component or for various fluids. However, for relatively micro-pore systems the permeability for either component or for various fluids may differ, *i.e.*, the boundary is differentially permeable (see Ref. [11], p. 646–648). This difference in permeability of a membrane is still a characteristic of the boundary, but its value is restricted to a particular component or fluid. Thus, while the permeability coefficient may be relatively constant under macro-conditions toward most substances for flux, under relatively micro-conditions the coefficient is restricted in its constancy, *i.e.*, it is limited with reference to a particular component, as is always the case for example in migratory flux whether a physical boundary is present or absent. This limitation on the value of the permeability term is even the more restricted where chemical or electrical properties of the boundary are concerned, as is usual in living systems as well as often in certain inanimate systems such as soils. Again, the permeability is a resultant value for a particular situation, varying in space and with time. Thus it would seem that the only hope for evaluation of permeability as an approximate constant for a boundary toward all substances, would lie with macro-pore systems. All others are delimited to a particular substance under a particular situation.

The second case which may be discussed from Figure 1 is more complicated. Situations may be considered where the compositions between phases differ. Here the flux intensities apart from permeability factors, are related to more than one effect. Where pressure, composition, temperature and galvanic effects differ between phases or along the path of flux, the energy intensity for flux of any component is the resultant of all influences under the particular situation. For migration, such resultant tendencies have been discussed elsewhere [4 5 6 7 8]. Further, where more than one physico-chemical factor is concerned, there are complicated interrelated effects between these and the nature of the boundary which are dynamic in space and with time. It would seem fortuitous to seek constancy of medium

with respect to permeability thereof in many natural systems. However, some systems may lend themselves to simpler treatment and for any such, an approximation can be approached to characterize the system for flux at a particular time. All results are of this nature, some being more nearly valid than others, their usefulness depending on the circumstances in any particular case.

In this treatment, saturated conditions are generally considered for both component and composite movements. Although composite movement is probably restricted to saturated flow, or at least continuous fluid columns, component migration is applicable to movements under either saturated or unsaturated conditions. The energy differences concerned are generally obtainable from some measurement of colligative properties of the moving substance and other factors from experimental observations on rates of movement under particular situations.

One limitation in all rate computations lies in the estimation of movement per unit time while the equational relations are restrictive to a particular set of conditions. This limitation confines correct analysis to constant conditions, but all natural systems vary in space and with time. The spatial relation may be evaluated as a resultant in the coefficient; variation with time cannot be comprehended equationally.

The most frequent parameters concerned with directed movements of materials in space are recorded in the above discussion. For particular situations, others may be included where necessary and known. Those given are general. For movements of materials into plants, the parameters of permeability have not been elucidated though hypotheses on causal limitations have been advanced [3 14 17].

This discussion has been limited to possible flux of aqueous solutions, and their components. Movements of gases have been considered by students of photosynthesis [10] and soils [2 12]. Data on transfer of gases between soils and plant roots especially in the rhizosphere, are lacking and to be desired.

SUMMARY

Comparison is made between the flux equation for migration of components in solutions or across boundaries and the flow equation for movement of composite fluids through media such as soils. The similarity between these is drawn, and seeming differences based on viewpoint are elucidated. A sug-

gestion is made for common usage of a relative permeability coefficient applicable to both modes of approach.

Received November 14, 1955.

LITERATURE CITED

1 American Standards Association, Sectional committee on fluid permeation(Z59) Progress Report: 1–17 (June 1951).
2 Baver, L. D., Soil Physics. J. Wiley and Sons, N.Y. (1948).
3 Brooks, S. C. and Brooks, M. M., The permeability of living cells. Protoplasma Monographien **19**, 1–395 (1941).
4 Broyer, T. C., The movement of substances through a two-phased solution system. Science **105**, 67–69 (1947).
5 Broyer, T. C., The movement of materials into plants. I. Osmosis and the movement of water into plants. Botan. Rev. **13**, 1–58 (1947).
6 Broyer, T. C., The movement of materials into plants. II. The nature of solute movement into plants. Botan. Rev. **13**, 125–167 (1947).
7 Broyer, T. C., An outline of energetics in relation to the movement of materials through a two-phased solution system. Plant Physiol. **26**, 598–610 (1951).
8 Broyer, T. C., Further theoretical considerations of modes of expression and factors possibly concerned in the movement of materials through a two-phased solution system. Plant Physiol. **26**, 655–676 (1951).
9 Bull, H. B., Physical Biochemistry. J. Wiley and Sons, N.Y. (1943).
10 Franck, J. and Loomis, W. E., Photosynthesis in plants. Iowa State College Press, Ames, Iowa (1949).
11 Glasstone, S., Textbook of Physical Chemistry. D. Van Nostrand Co., N.Y. (1940).
12 Hagan, R. M., Movement of carbon disulfide vapor in soils. Hilgardia **14**, 83–118 (1941).
13 Lewis, G. N. and Randall, M., Thermodynamics and the Free Energy of Chemical Substances. McGraw-Hill Book Co., N.Y. (1923).
14 Meyer, B. S and Anderson, D. B., Plant Physiology. D. Van Nostrand Co., N.Y. (1952).
15 Richards, L. A., Concerning permeability units for soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. **5**, 49–53 (1940).
16 Richards, L. A., Permeability and infiltration. Report of Subcommittee of Soil Science Soc. Amer. Mimeographed, pp. 1–10 (1951).
17 Stiles, W., Permeability. Wheldon and Wesley Ltd., London (1924).
18 Report of Committee on Ground Water. Appendix A. Report of the subcommittee on permeability. Trans. Amer. Geophys. Union **27**, 245–273 (1944–1945).

Plant and Soil VII, no 4 June 1956

MANGANBEDARF DES HAFERS IN VERSCHIEDENEN WACHSTUMSSTADIEN

von A. FINCK

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel

EINLEITUNG

Der Manganbedarf des Hafers ist heute annähernd bekannt, über dessen zeitliche Verteilung liegen dagegen nur wenige Erfahrungen vor. Eine Klärung dieser Frage ist aber wichtig. Feldbeobachtungen zeigen nämlich, daß die Dörrfleckenkrankheit hauptsächlich im Mai auftritt. Als Ursache für diese Häufung macht man bei angenommener gleichmäßiger Verteilung des Mn-Bedarfs die Mn-Festlegung durch Trockenheit verantwortlich. Andererseits ist jedoch auch denkbar, daß bei gleichbleibender Anlieferung aus dem Boden der Bedarf der Haferpflanzen im Mai ein Maximum aufweist.

Coïc und Coppenet[2] schließen aus Topfversuchen auf eine kritische Periode der Manganernährung des Hafers im Mai. Ihr Untersuchungsmaterial erlaubt es ihnen jedoch nicht, die beiden Möglichkeiten der schlechten Mn-Anlieferung oder des zeitweilig hohen Mn-Bedarfs klar zu trennen. Lundegärdh[8] betonte, daß in Zeiten starken Wachstums eine erhöhte Mn-Zufuhr nötig sei. Steenbjerg[15] fand im Juni eine starke Mn-Aufnahme durch Pflanzen, die unter Manganmangel litten. Nach Nicholas und Fisher[10] können am Hafer im Juni auch dann noch Dörrflecken auftreten, wenn im April und Mai mehrmals mit Mn gespritzt wurde.

Ovinge[11], Lewis[7] und Heintze[4] zeigten, daß bei Erbsen eine gute Mn-Versorgung am Anfang der Wachstumszeit keineswegs genügte, sondern daß die Mn-Zufuhr während der Blütezeit am wirkungsvollsten war. Offenbar verlangen einige Pflanzen also eine Periode reichlicher Mn-Anlieferung.

Die vorliegende Arbeit soll klären, ob und wann für Hafer eine

kritische Periode hohen Mn-Bedarfs besteht. Diese Frage kann nur mit Hilfe eines Wasserkulturversuchs beantwortet werden, da daß angebotene Mangan verfügbar bleiben und die Mn-Zufuhr in einigen Versuchsreihen unterbrochen werden muß.

METHODE

Hafer in Wasserkultur mit 12 Versuchsgliedern zu je 3 Parallelen (Svalöfs Goldregen III) wurde über verschiedene Zeiträume in Mn-freier und Mn-haltiger Nährlösung nach Hoagland (*general solution*) gezogen. Die Fe-Versorgung erfolgte dagegen nach Jacobson[5] mit Fe-Komplexon. Diese Nährlösung wählten wir, weil keine adsorbierenden Niederschläge auftreten und weil sie nach Schropp[14] ein relativ gutes Haferwachstum ermöglicht. Da das Ziel der Arbeit nicht darin lag, eine Mn-Zufuhr völlig auszuschließen, wurden die *‚pro analysi'*-Reagenzien nicht weiter gereinigt und auch nur einfach quarzdestilliertes Wasser verwandt. Wir hofften, auf diese Weise der sehr geringen Mn-Anlieferung eines stark Mn-festlegenden Bodens nahezukommen. Allen Pflanzen standen 2 γ Mn im Samen und wenige γ in der Nährlösung zur Verfügung.

Die Körner wurden am 2.IV.1955 in ein Torfbett gesät, und die Pflanzen am 7.IV. zu je drei in 1 Liter-Glasgefäße zunächst in $^1/_5$ verdünnte Nährlösung gepflanzt. Ab 14.IV. stand die volle Nährlösung zur Verfügung, die nach jeweils 2 Dekaden gewechselt wurde. Die Belüftung der im Gewächshaus aufgestellten Gefäße erfolgte täglich. Geerntet wurde eine Parallele am 5.VI. (Pflanzenhöhe 60 cm) und 2 Parallelen am 1.VIII. (Pflanzenhöhe 100 cm), und zwar getrennt nach Sproß, Wurzeln und — gegebenenfalls — Körnern. Bei der 2. Ernte war ein Teil der Nachschosser noch nicht ganz reif. Die Reinigung der Sprosse erfolgte mit Wasser, die der Wurzeln mit 1%iger warmer Dithionitlösung ($Na_2S_2O_4$). Die gereinigten Pflanzenteile wurden getrocknet und trocken verascht. (1. Veraschung bei 550°C, Entfernung des freigewordenen Mangans mit HNO_3, 2. Veraschung bei 750°C). Mn bestimmten wir nach der Perjodatmethode.

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Versuchsanlage und Ergebnisse zeigt Figur 1. Von den Analysen sind nur die Daten für die Sproße angeführt, weil nur der Teil des Pflanzen-Mangans zur Verhinderung der Dörrflecken wirksam ist, der sich jeweils im Sproß befindet. Weiterhin erfolgt nach der Blüte ein teilweiser Abbau der Wurzeln (Köhnlein und Vetter[6]). Die Beurteilung der Mn-Versorgung erfolgt in erster Linie durch Mangelsymptome und Mn-Gehalte der Pflanzen. Die Erträge stimmen im allgemeinen damit überein.

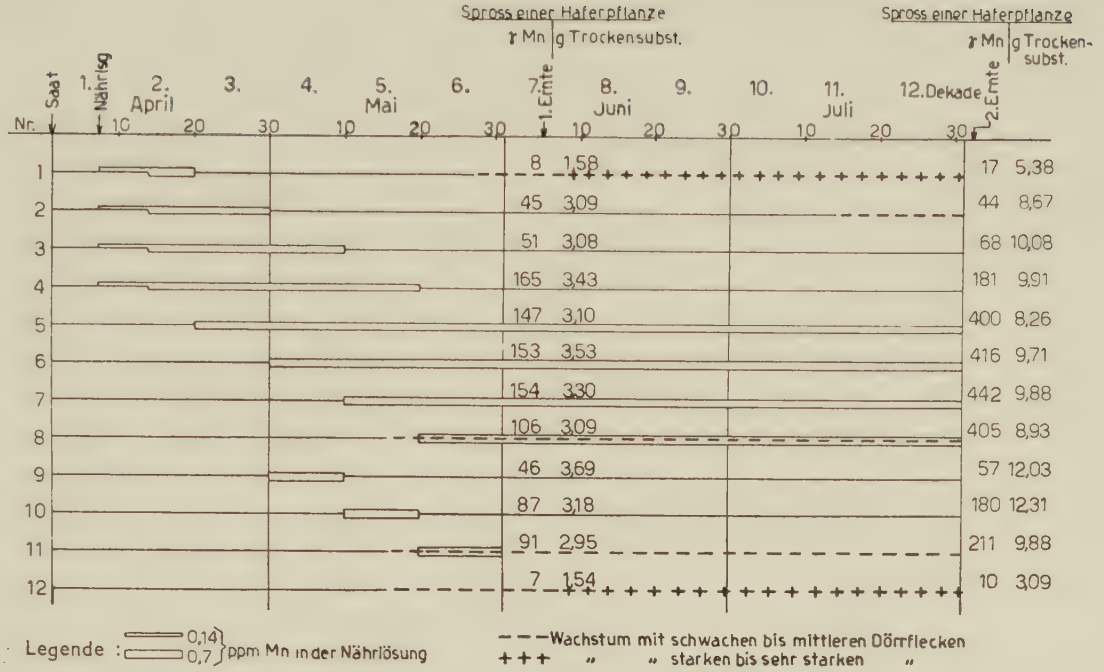


Fig. 1. Haferwachstum bei zeitlich gestaffelter Mn-Zufuhr.

Einige Unstimmigkeiten entstehen lediglich durch eine schwache Eisenchlorose, die Ertragsdepressionen bei guter Mn-Versorgung (besonders Versuche 5 und 6) und deren völliges Fehlen eine Erhöhung des Endertrages (9 und 10) bewirkt. Für die vorliegende Fragestellung kann die Chlorose jedoch unberücksichtigt bleiben, da sie erst nach der entscheidenden Zeitspanne deutlich wurde.

Aus Figur 1 folgt, daß zur Verhinderung des Auftretens von Dörrflecken eine gute Mn-Versorgung einerseits bis zum Ende der 5. Dekade (Versuch 4), andererseits vom Anfang der 5. Dekade (Versuch 7) völlig ausreicht. Ohne Mn-Zufuhr (Versuch 12) treten die Dörrflecken in der 5. Dekade auf, und zwar zu Beginn des 5-Blatt-Stadiums am dritten Blatt. Diese drei Versuche zeigen deutlich den Beginn einer kritischen Phase hohen Mn-Bedarfs in der 5. Dekade. Versuch 9 und 10 bestätigen diesen Befund. Eine kurzzeitige Mn-Zufuhr wirkt in dieser Zeit am besten. Es ist dies die Zeit einer starken Zunahme der Pflanzenmasse und die entscheidende Phase für den Aufbau des photosyntetisch wirksamen Gewebes. Am Zeitpunkt der 1. Ernte war $^1/_3$ der Trockensubstanz gebildet.

Aus dem vorliegenden Versuch kann man zwar gut den Beginn, jedoch nicht eindeutig das Ende der Phase hohen Mn-Bedarfs ermitteln. Diese Unsicherheit ist dadurch bedingt, daß man selbst in Wasserkultur die Manganzufuhr nicht plötzlich unterbinden kann. So folgt z.B. aus dem Vergleich der Mn-Gehalte der Früh- und Normalernten (1. und 2. Ernte) der Versuche 10 und 11, daß auch ohne Mn-Zufuhr aus der Nährlösung ein Mn-Transport aus der Wurzel in den Sproß stattfindet. Weiterhin kann man beim Umsetzen in Mn-freie Lösung an der Wurzel haftende Mn- und Fe-Oxydhydrate schwer entfernen. Eine Dithionit-Reinigung dürfte bei der lebenden Wurzel kaum angebracht sein. Allenfalls läßt noch Versuch 9 das Bestimmen eines Endpunktes zu. Hier war die Mn-Zufuhr zum Sproß bereits Anfang Juni weitgehend beendet; dennoch wurde eine hohe, Mn-reiche Ernte erzielt, wie der Vergleich der Mn-Gehalte beider Ernten zeigt. Die Phase hohen Mn-Bedarfs der Hafersprosse liegt somit im vorliegenden Versuch nicht nur in der 5., sondern auch in der 6. Dekade. Sicher könnte der Endpunkt durch eine Reihe unterschiedlich hoher Mn-Gaben besser bestimmt werden.

Gute Jugendversorgung mit Mn im April verzögert das Auftreten des Mangels und mildert Symptome und Ertragsdepression (Versuch 2). Mn-Zufuhr kurz nach Beginn der kritischen Phase bringt die

vorhandenen Symptome zwar nicht zum Verschwinden, führt aber noch zu einem guten Ertrag (Versuche 8 und 11).

Mn-Gehalt der Pflanze und Auftreten der Dörrflecken stimmen gut überein. Die Pflanzen bleiben gesund, wenn die Mn-Konzentration der 60 cm hohen Pflanzen am 5. Juni mehr als 12 ppm beträgt. Nur wenn nach dem Auftreten der Dörrfleckenkrankheit eine Mn-Zufuhr stattfindet, kommen dörrfleckenkranke Pflanzen mit hohen Mn-Gehalten zustande (Versuche 8 und 11).

Sehr typisch für die Mn-Mangelpflanzen ist das Auftreten von Nachschossern im Juni, wie es bereits Coïc und Coppenet[2] erwähnen. Die gesonderte Analyse der Nachschosser bei der Ernte zeigt, daß die knapp mit Mn versorgten Pflanzen einen großen Teil des Mangans aus den ersten Trieben in die Nachschosser verlagern, weil keine Mn-Zufuhr mehr stattfindet und auch der Wurzelvorrat nicht ausreicht. Trotz dieser Verlagerung traten im Versuch 2 an den Nachschossern im Juni noch schwache Dörrflecken auf.

Um die Wirkung der unterschiedlichen Mn-Gaben auf die Eisenaufnahme zu prüfen, wurden bei der ersten Ernte die Fe-Gehalte des Sprosses ermittelt. Die bekannte Erscheinung, daß die Fe-Zufuhr zum Sproß durch ein reichliches Mn-Angebot verringert wird, trat besonders dann auf, wenn die Mn-Zufuhr ab Mitte Mai stattfand.

DISKUSSION

Auch der Hafer hat eine kritische Phase der Mn-Ernährung, wie es Ovinge[11] für Erbsen feststellte (Für Tomaten: siehe Ahmed und Twyman[1a]). Sie liegt jedoch früher als diejenige für Erbsen. Schon Maximow[9] weist auf den zeitlichen Unterschied der Nährstoffaufnahme zwischen Hafer und Erbsen hin. Nach Goodall und Gregory[3] gehört Sommergetreide zu den Pflanzen mit relativ kurzzeitigem, starkem Meristemwachstum. Neuerdings zeigt Achtnich[1], daß Hafer in Wasserkulturen die Hauptnährstoffe vor allem kurz vor und während des Schossens benötigt.

Gemessen am Auftreten der Dörrflecken liegt die kritische Phase in der 5. und 6. Dekade. Diese Aussage bedarf noch einer Ergänzung. Da dem äußerlich sichtbaren Auftreten von Symptomen sicher eine Phase mit nur mikroskopisch nachweisbaren Veränderungen vorangeht, dürfte die kritische Phase schon in der 4. Dekade beginnen. Es ist leider bisher nicht bekannt, wie lange es dauert, bis sich erste,

kleinste Veränderungen in deutlich sichtbaren Symptomen äußern. Auf der anderen Seite zeigt Versuch 9 und der nur mit Einschränkung mit vorliegendem Ergebnis vergleichbare Versuch von Nicholas und Fisher[10], daß eine Mn-Zufuhr noch bis Anfang Juni erforderlich ist. Für die optimale Mn-Versorgung des Hafers dürfte somit eine Phase hoher Mn-Zufuhr von Anfang Mai bis Anfang Juni mit einem Maximum in der 5. und 6. Dekade erforderlich sein. Die kritische Phase ist offensichtlich nicht allein durch die Zuwachsrate bedingt (bis zum Ende der kritischen Phase wurden erst knapp 50% des Reifegewichts erreicht), sondern im Verlauf der biochemischen Reaktionen begründet.

Im vorliegenden Versuch war das Auftreten der Dörrfleckenkrankheit und erst in zweiter Linie der Ertrag ein Maß für die kritische Phase. Es ist aber zu beachten, daß zur Erzielung des Höchstertrages eine bessere Mn-Zufuhr als zur Vermeidung von Dörrflecken notwendig ist.

Wenn Steenbjerg[15] eine starke Mn-Aufnahme von Mangelpflanzen im Juni fand, so ist dies durch deren schlechte Mn-Versorgung im Mai zu erklären. Versuch 11 zeigt ein ähnliches Ergebnis.

Die im Wasserkulturversuch ermittelte kritische Phase der Mn-Aufnahme stimmt mit dem im Felde beobachteten häufigen Auftreten der Dörrflecken von Mitte Mai bis Anfang Juni gut überein. Die Vermutung von Coïc und Coppenet[2] kann also bestätigt werden. Das häufige Auftreten des Mn-Mangels des Hafers im Mai braucht nicht allein durch eine schlechte Mn-Anlieferung aus dem Boden während der Mai-Trockenheit verursacht, sondern kann außerdem durch einen hohen Mn-Bedarf des Hafers während dieser Zeit bedingt sein.

Dies Ergebnis hat praktische Bedeutung für die Mn-Düngung. Pfaff, Roth und Buchner[12] finden eine ungenügende Wirkung von kleinen Mn-Gaben mit der Grunddüngung zur Saat. Wahrscheinlich könnte man mit derselben Menge eine wesentlich bessere Mn-Wirkung mit einer Düngung im Mai erzielen. Es wäre somit wirksamer, Mn-haltige Kopfdünger statt Grunddünger zu verwenden.

An den vorliegenden Versuch kann man noch eine theoretische Überlegung anschließen. Spurenelemente werden von der Pflanze nur in geringen Mengen benötigt. Diese geringen Mengen, die mit den früheren gröberen Methoden kaum nachweisbar waren, können aber von einem anderen, der tatsächlichen

Wirkung mehr gerecht werdenden Blickpunkt eine ganz andere Größenordnung annehmen. Das zeigt folgende Berechnung der Zahl der Mn-Ionen pro Pflanzenzelle. Eine junge Haferpflanze muß im kritischen 4/5-Blatt-Stadium mindestens 60 γ Mn (3 g Trockensubstanz mit 20 ppm) enthalten, das sind unter Zugrundelegung der Loschmidtschen Zahl etwa $6 \cdot 10^{17}$ Atome Mn. Die Berechnung der Zellzahl ist leider mit einiger Unsicherheit behaftet. Nach Hooke (zit. bei Robbins und Weier[13]) sind in 1 cm^3 Kork etwa $8 \cdot 10^7$ Zellen enthalten. Nach Troll[16] beträgt der durchschnittliche Zelldurchmesser 50 μ, was 10^7 Zellen/cm^3 ergäbe. Rechnet man also mit 10^8 Zellen pro cm^3, so ergibt das etwa 10^9 Zellen pro Pflanze. In einer Zelle sind somit 10^8 Atome (Ionen) Mn enthalten (bei gedachter gleichmäßiger Verteilung in der Pflanze). Für das Spurenelement Mangan kommt man so auf die beachtliche Zahl von mehreren Millionen Ionen pro Zelle.

ZUSAMMENFASSUNG

1. Zur Ermittlung der zeitlichen Verteilung des Manganbedarfs wurden Haferpflanzen in Wasserkulturen während der Jugendentwicklung unterschiedlich lange mit Mn versorgt.

2. Es besteht eine kritische Phase hohen Mn-Bedarfs von der 4. bis zur 7. Wachstumsdekade (Anfang Mai bis Anfang Juni) mit einem Maximum in der 5. und 6. Dekade. In dieser Zeit wird der größte Teil des photosynthetisch wirksamen Gewebes aufgebaut.

3. Gute Mn-Versorgung in den ersten Dekaden (April) verhindert zwar nicht das Auftreten von Dörrflecken, mildert aber Symptome und Ertragsdepression.

4. Das häufige Auftreten der Dörrfleckenkrankheit im Mai braucht also nicht allein durch zeitweilig schlechte Verfügbarkeit des Bodenmangans, sondern kann ebenfalls durch den hohen Mn-Bedarf während dieser Zeit bedingt sein.

Für die Betreuung der Wasserkulturversuche bin ich Frau I. Kosegarten sehr zu Dank verpflichtet.

Eingegangen am 2. Dezember 1955.

LITERATURVERZEICHNIS

1 Achtnich, W., Der Einfluss zeitlich variierter Nährstoffgaben auf den Ertrag bei Gerste und Hafer. Z. Acker- u. Pflanzenbau **99**, 273–293 (1955).

1*a* Ahmed, B. M. und Twyman, E. S., Manganese requirements of tomato plants at different phases of growth. Nature **171**, 438-439 (1953).

2 Coïc, M. Y. und Coppenet, M., Expérience sur la carence en manganèse de l'avoine: Existence d'une période critique. Compt. Rend. Acad. Agr. France **37**, 106–107 (1951).

3 Goodall, D. W. und Gregory, F. G., Chemical composition of plants as an index of their nutritional status. Imp. Bur. Hort. Plantation Crops East Malling Tech. Commun. 17 (1947).

4 Heintze, S. G., Manganese deficiency in peas and other crops in relation to availability of soil manganese. J. Agr. Sci. **36**, 227–238 (1946).
5 Jacobson, L., Maintenance of iron supply in nutrient solutions by a single addition of ferric potassium ethylenediamine tetra-acetate. Plant Physiol. **26**, 411–413 (1951).
6 Köhnlein, J. und Vetter, H., Ernterückstände und Wurzelbild. Parey, Hamburg (1953).
7 Lewis, A. H., Manganese defiencies in crops. I. Spraying pea crops with solutions of manganese salts to eliminate marsh spot. Empire J. Exptl. Agr. **7**, 150–154 (1939), zit. in: Bibl. of the Literature on the Minor Elements **I**, 1356 (1948).
8 Lundegårdh, H., Die Nährstoffaufnahme der Pflanzen. Fischer, Jena (1932).
9 Maximow, N. A., Kurzes Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. Verlag Kultur und Fortschritt, Berlin (1951).
10 Nicholas, D. J. D. und Fisher, D. J., The manganese status of cereal crops in relation to yield of grain and straw. I. Field experiment on oats. Ann. Rept. Long Ashton Research Sta. 77–87 (1951).
11 Ovinge, A., Marsh spot in Schokker peas. Tijdschr. Plantenziekten **43**, 67–73 (1937), zit. in: Bibl. of the Literature on the Minor Elements **I**, 1384 (1948).
12 Pfaff, C., Roth, A. und Buchner, A., Zur Düngung mit Mikronährstoffen. Landwirtsch. Forsch. **7**, 73–81 (1955).
13 Robbins, W. W. und Weier, T. E., Botany, an Introduction to Plant Science. Wiley, New York (1950).
14 Schropp, W., Der Vegetationsversuch. 1. Die Methodik der Wasserkultur höherer Pflanzen. Neumann, Radebeul (1951).
15 Steenbjerg, F. und Boken, E., Mangan, kobber og bor i vaarsaed paa forskellige udviklingsstadier. Tidskr. Planteavl **47**, 100–134 (1942).
16 Troll, W., Allgemeine Botanik. Enke, Stuttgart (1948).